



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## SPELEOLOGICKÁ SVÍTILNA

SPELEOLOGICAL FLASHLIGHT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Kaderka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Jakub Kaderka

**ID:** 173672

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Speleologická svítilna

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte návrh a realizaci speleologické svítilny s optimalizovanými parametry. Součástí úkolu bude realizace čelové svítilny, externího zdroje a nabíječky. Svítilna bude disponovat automatickou regulací jasu podle intenzity odraženého světla. V rámci práce bude provedena optimalizace všech součástí, tedy: svítilny, zdroje a nabíječky. Svítilna a zdroj budou provedeny s patřičnou odolností proti vnějším vlivům. V bakalářské práci bude proveden soupis požadavků kladených na zařízení, bude provedena rešerše stávajících a dostupných řešení a budou stanoveny cíle vedoucí ke zlepšení stávajících zařízení. Dále bude popsán návrh a realizace systému. V závěru práce bude popsáno testování provozu a měření vybraných parametrů speleologické svítilny.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Vladimír Levek

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

V úvodu práce je provedena rešerše existujících svítilen určených pro speleologii a jsou stanoveny cíle pro zlepšení stávajících řešení. V další části je popsáno zapojení snižujícího budiče LED s hysterezním řízením. Je rozebrán výběr vhodných součástek a jejich vliv na účinnost budiče. Dále je navržena nabíječka Li-Ion akumulátorů a ochranná elektronika pro akumulátory.

Závěrečná část práce se zabývá konstrukcí funkčního vzorku svítilny a jejím testováním. Účinnost navrženého budiče dosahuje 96 % a maximální světelný tok je 869 lumenů.

Automatická regulace výkonu svítilny dle množství odraženého světla se v podmínkách blátivého podzemí neosvědčila.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

LED, svítilna, Li-Ion nabíječka, hysterezní snižující měnič, speleologie

## **ABSTRACT**

Existing speleology headlamps are discussed and several improvement are proposed in the beginning of the thesis. A switched hysteresis buck LED driver is designed. Part selection process is mentioned with focus on driver efficiency. Li-Ion charger and battery protection circuit is discussed.

Final part of the thesis describes construction of working lamp prototype and measurements of its characteristics. The LED driver reaches efficiency of 96 %, the maximal luminous flux is 869 lumens.

The automated light regulation based on measuring amount of reflected light was found to be inefficient in a muddy underground.

## **KEYWORDS**

LED, flashlight, Li-Ion charger, hysteresis buck driver, speleology

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Speleologická svítilna“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Vladimíru Levkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci, panu Ing. Jaroslavu Štěpánkovi za pomoc při měření optických vlastností svítilny a speleologické skupině ZO ČSS 6-21 Myotis za exkurze do veřejnosti nepřístupných jeskyní

Brno .....

.....

podpis autora



# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>1 Rozbor stávajících řešení</b>	<b>9</b>
1.1 Existující produkty . . . . .	9
1.1.1 Karbidová lampa . . . . .	9
1.1.2 Scurion . . . . .	10
1.1.3 Zebralight . . . . .	11
1.1.4 Petzl Duo LED 14 . . . . .	12
1.1.5 Petzl Nao . . . . .	12
1.1.6 DarkStar MkI . . . . .	13
1.2 Základní požadavky na svítilnu . . . . .	14
1.2.1 Možnosti zlepšení stávajících řešení . . . . .	14
1.2.2 Požadované technické parametry . . . . .	15
<b>2 Parametry svítivých diod</b>	<b>16</b>
2.1 Světelný tok . . . . .	16
2.2 Měrný výkon . . . . .	16
2.3 Index podání barev . . . . .	16
2.4 Teplota chromatičnosti . . . . .	17
2.5 Teplotní charakteristiky . . . . .	17
2.6 Výběr konkrétní LED . . . . .	19
<b>3 Spínané budiče LED</b>	<b>20</b>
3.1 Základní topologie spínaných DC/DC měničů . . . . .	20
3.1.1 Snižující měnič . . . . .	20
3.1.2 Zvyšující měnič . . . . .	20
3.1.3 SEPIC . . . . .	21
3.2 Hysterezní řízení . . . . .	21
3.3 Ztráty spínaných DC/DC měničů . . . . .	22
3.3.1 Ztráty na polovodičových součástkách . . . . .	22
3.3.2 Ztráty na induktoru . . . . .	23
<b>4 Napájecí zdroje</b>	<b>24</b>
4.1 Primární články . . . . .	24
4.2 Akumulátory . . . . .	24
4.3 Parametry vybraného akumulátoru . . . . .	25
4.4 Nabíjení Li-Ion . . . . .	26

<b>5</b>	<b>Návrh zapojení a výběr součástek</b>	<b>27</b>
5.1	Budič LED . . . . .	27
5.1.1	Výběr topologie . . . . .	27
5.1.2	Návrh zapojení . . . . .	28
5.1.3	Základní parametry . . . . .	28
5.1.4	Induktor . . . . .	29
5.1.5	Spínací dioda . . . . .	30
5.1.6	Spínací tranzistor . . . . .	30
5.1.7	Řídicí obvod měniče . . . . .	31
5.1.8	Teoretická účinnost budiče . . . . .	33
5.2	Mikroprocesor . . . . .	33
5.2.1	Měření napájecího napětí . . . . .	34
5.2.2	Řízení proudu budičů LED . . . . .	34
5.3	Měření množství odraženého světla . . . . .	35
5.4	Nabíječka Li-Ion akumulátorů . . . . .	35
5.5	Ochrana akumulátorů . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Realizace</b>	<b>38</b>
6.1	Mechanická konstrukce . . . . .	38
6.1.1	Tepelné vlastnosti . . . . .	38
6.1.2	Výroba těla . . . . .	40
6.1.3	Pouzdro na akumulátory . . . . .	41
6.1.4	Nabíječka na akumulátory . . . . .	41
6.2	Optická soustava . . . . .	42
6.3	Programové vybavení . . . . .	42
6.3.1	Čtení stavu tlačítek . . . . .	43
6.3.2	Řízení jasu LED . . . . .	43
6.3.3	PI regulátor . . . . .	44
6.3.4	Řídicí logika . . . . .	44
<b>7</b>	<b>Měření a testování</b>	<b>47</b>
7.1	Budič LED . . . . .	47
7.1.1	Účinnost . . . . .	47
7.2	Spotřeba energie . . . . .	49
7.3	Světelné vlastnosti . . . . .	49
7.3.1	Spektrální složení . . . . .	50
7.3.2	Světelný tok . . . . .	50
7.4	Teplotní vlastnosti . . . . .	50
7.5	Mechanická odolnost . . . . .	52
7.6	Testování v podzemí . . . . .	52
7.7	Automatická regulace jasu . . . . .	53

<b>8 Závěr</b>	<b>55</b>
<b>Literatura</b>	<b>57</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>59</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>62</b>
<b>A Odvození použitých rovnic</b>	<b>63</b>
A.1 Odvození hysterezního napětí nesymetricky napájeného komparátoru . . .	63
A.2 Odvození přenosu a mezní frekvence zatížené dolní propusti . . . . .	63
<b>B Schémata zapojení</b>	<b>65</b>
B.1 Nabíječka Li-Ion . . . . .	65
B.2 Svítílka . . . . .	66
<b>C Výkres těla svítilny</b>	<b>66</b>

## ÚVOD

V podzemí se nacházejí jedny z posledních míst na Zemi, kam lidská noha nikdy nevzkročila. Za každým jeskynním komínem, za každým nánosem sedimentů se mohou skrývat doposud neobjevené prostory. Výzkumem těchto přírodních podzemních prostor se zabývá vědní disciplína speleologie.

Pohyb a práce v podzemí klade velké nároky na vybavení, zvláště pak na zdroj světla, jehož selhání při slaňování či slézání komplikovaného terénu by mohlo mít vážné následky a to i přes skutečnost, že každý speleolog by u sebe měl mít minimálně dva nezávislé zdroje světla.

Prakticky celé minulé století dominovala svítidlům v podzemí tzv. karbidka (viz. dále). Teprve v posledních desetiletích se začaly více prosazovat elektrické zdroje světla. Svítilny s žárovkami ale nedosahovaly světelného výkonu a úspornosti karbidových svítilen. Až rozvoj svítivých diod (LED) a vysokokapacitních akumulátorů v posledních dvaceti letech zapříčinil postupné vyřazování karbidových svítilen z výbav speleologů.

Na rozdíl od důlních svítidel, která jsou používána v poměrně málo členitém prostředí dolů s minimálními požadavky na intenzitu produkovaného světla, je u speleologických svítilen vyžadován velký rozsah regulace výstupního výkonu. Při práci na čelbě prolonační štoly dostačuje minimální množství světla, při fotografování, průzkumu vysokého komínu či rozměrného dómu je naopak vyžadováno osvětlení co největší části daného prostoru.

Pohyb v podzemí klade vysoké nároky na mechanickou odolnost svítilny, dochází k nárazům na vyčnívající kameny, rázům při skocích, obalení blátem a šterkem, ponoření do vody, atd. Určujícím znakem pro kvalitní svítilnu je tak i mechanicky vysoce odolné tělo.

Ve svém volném čase jsem se zabýval konstrukcí levné svítilny řešící výše uvedené problémy. Při praktickém užívání výsledného produktu bylo zjištěno množství nedostatků a objevilo se mnoho podnětů pro vylepšení funkčnosti a zjednodušení ovládání. V této práci bude rozebrán návrh nové speleologické svítilny. Výsledné řešení by mělo dosahovat kvalit komerčně vyráběných svítilen do podzemí za kusovou cenu nižší nebo obdobnou.

Část práce bude zaměřena na optimalizaci proudového budiče pro svítivé diody a rozbor důležitých parametrů LED.

Vzhledem k nutnosti používat obě ruce při mnoha náročných úkonech v podzemí, jako je např. výstup po laně, bude do návrhu zakomponováno měření okolního osvětlení pro automatické řízení jasu dle množství odraženého světla.

# 1 ROZBOR STÁVAJÍCÍCH ŘEŠENÍ

Na trhu se vyskytuje nepřeberné množství čelových svítilen v různých cenových kategoriích a technických provedeních. Pouze několik desítek produktů je dostatečně odolných pro použití ve speleologii. V této kapitole budou zmíněny pouze varianty mezi speleology nejrozšířenější a můj předchozí pokus o vlastní řešení. Dále budou rozebrány možnosti zlepšení stávajících svítilen a požadované vlastnosti nového modelu.

## 1.1 Existující produkty

### 1.1.1 Karbidová lampa

Jedná se o svítilnu (obrázek 1.1), která byla používána celé minulé století a i dnes se s ní dá poměrně často setkat.



Obr. 1.1: Karbidová svítilna Petzl Aceto (převzato z [3])

Světlo vzniká při hoření acetylenu vyráběného reakcí vody s karbidem vápenatým přímo v zásobníku karbidu, který se nosí na opasku.

Výhodou této svítilny je vysoký jas plamene, příjemná barevná teplota světla a teplo vznikající při hoření (zahřátí prochladlých rukou). V podzemí s přítomností vodních toků a ploch není nutné na delší expedice nosit zásobu vody, stačí mít jen dostatečné množství karbidu.

Otevřený plamen ale může poškodit lana a další lezeckou výstroj, spaluje kyslík, kterého bývá v některých prostorách nedostatek. Plamen svítilny může inicializovat výbuch případných důlních plynů. Saze vznikající při hoření navíc poškozují krápníkovou výzdobu.

Díky výše uvedeným nedostatkům dochází k nahrazování karbidových svítilen bezpečnějšími zdroji světla s LED. Nákup nové karbidové lampy je dnes problematický. Mezi

poslední dostupné výrobky patří svítilna Petzl Aceto s vyvíječem Petzl Ariane. Komplet stojí dle prodejce okolo 160 dolarů, svítilna samotná váží 95 gramů. Vyvíječ pojme zásobu 400 gramů karbidu vápenatého, což odpovídá přibližně 240 litrům acetylenu. Teoretická spotřeba se dle použité trysky pohybuje mezi 14–21 litry za hodinu.

### 1.1.2 Scurion

Scurion je řada švýcarských čelových svítilen určených pro speleologii, průzkum opuštěných důlních děl, jeskynní potápění, noční cyklistiku a další náročné činnosti.



Obr. 1.2: Scurion 1500 (převzato z [1])

Všechny modely využívají LED firmy Cree, nejvýkonnější varianta je založena na Cree XM-L2. Maximální světelný tok nejvyššího modelu dosahuje hodnoty 1300 lumenů. Pro osvětlení blízkého i vzdáleného okolí současně obsahuje svítilna dvě LED, jednu bez optiky, druhou s optikou zaostřující světlo do úzkého paprsku (výrobce neudává bližší specifikaci použité optiky). Udaná maximální účinnost elektroniky je 94 % [1].

Stav baterií indikuje pětice LED na plošném spoji svítilny. Volitelně je možno zakoupit optickou soustavu na promítání světla indikačních LED na stěnu, pro zjištění stavu baterie tak není nutné sundávat svítilnu z hlavy. Výrobce nabízí možnost instalace UV diody pro lepší rozpoznání nerostů, jeskynních živočichů a trasovacích látek.

Ovládání probíhá pomocí otočné osy, která v krajních polohách spíná dva mikrosplínače. Svítilna obsahuje až deset programovatelných módů. Jas každé LED lze nastavit ve čtyřech krocích. Běžně nabízené varianty mají barevnou teplotu světla 5600 K, existuje i model s teplotou 3000 K.

O napájení se starají Li-Ion akumulátory velikosti 18650 ve dvou až osmi článkovém provedení. Akumulátory jsou uloženy v samostatném pouzdře propojeném s tělem svítilny kabelem.

Eloxované hliníkové tělo chrání elektroniku před ponořením dle normy IP68. Běžná verze umožňuje ponoření do 20 metrů, verze pro potápěče byla testována do 150 metrů. Výrobce udává hmotnost těla 160 gramů, hliníkové pouzdro na baterie váží 111 gramů.

Jedná se o jednu z prvních LED svítilen pro speleologii tohoto konstrukčního provedení. Díky vysoké ceně (460 dolarů za základní model, 880 za nejvýkonnější) u nás není příliš rozšířená.

Z konstrukce Scurionu vycházejí svítilny jako Rude Nora, ElSpeleo, Earthworm a Pulsar, které mají podobné provedení i technické parametry.

### 1.1.3 Zebralight

Svítilny Zebralight mají válcovité tělo s LED otočenou o  $90^\circ$  od osy. Výrobce používá diody firmy Cree, nejčastěji typ XM-L2. V menší míře, převážně u starších a menších modelů, se vyskytují i XHP35 a XP-E. Barevná teplota světla se pohybuje dle modelu mezi 4000 K až 6300 K, maximální tok závisí na typu svítilny (100 až 1100 lumenů).



Obr. 1.3: Svítilna ZebraLight (převzato z [2])

Nejčastěji dodávaná optika má vyzařovací úhel  $90^\circ$ . K dispozici jsou i varianty s kombinovanou optikou, kdy široký paprsek obsahuje zvýrazněný střed.

Napájecí akumulátor umístěný v těle svítilny určuje její celkovou velikost. K dispozici jsou varianty na jednu Li-Ion 18650, primární články velikosti AA, nebo CR123A.

Svítilna disponuje čtyřmi primárními režimy — blikání, nízký, střední a vysoký jas. Každý z režimů obsahuje dva sekundární módy. Ovládání probíhá pomocí jednoho tlačítka, kdy módy jsou přepínány různým počtem stisknutí a jeho délkou. Stav baterií indikuje na vyžádání uživatel počet bliknutí LED. Ovládání díky vyšší složitosti vyžaduje cvik.

Tělo je vyrobeno z eloxovaného hliníku, bateriový prostor uzavírá šroubovací víčko s těsněním. Výrobce deklaruje krytí IPX7 [2].

Svítilny firmy Zebralight, ač nejsou primárně určené pro speleologii, se mezi speleology těší značné oblibě díky své nízké ceně (pod 90 dolarů), robustnímu tělu a malé hmotnosti. Nevýhodou je složité ovládání a nemožnost použít vícečlánkový akumulátor.

Podobné konstrukční řešení využívají svítilny české firmy Fénix, zvláště u modelu HL50 je podobnost se svítilnami Zebralight velmi výrazná.

#### 1.1.4 Petzl Duo LED 14

Firma Petzl patří mezi světoznámé výrobce čelových svítilen a vybavení pro skalní lezení a speleologii. Možná i díky cenově výhodnému setu Petzl Spelios — přilby se svítilnou Duo za 250 dolarů (samostatná svítilna stojí okolo 170 dolarů) — patří Duo mezi nejrozšířenější svítilny do podzemí.



Obr. 1.4: Svítilna Petzl Duo LED 14 (převzato z [3])

Svítilna obsahuje 14 běžných 5mm LED pro osvětlení blízkého okolí a halogenovou žárovku s parabolickým zrcadlem pro daleký dosvit. Maximální uváděný světelný tok dosahuje 67 lumenů, barevná teplota se pohybuje okolo 5200 K.

Elektroniku napájí čtveřice článků velikosti AA v samostatném pouzdře. Výrobce nabízí i variantu s akumulátorem Accu Duo o kapacitě 2700 mAh.

Pomocí otočného přepínače na boku svítilny lze přepínat mezi čtyřmi režimy pro svítivé diody a dvěma pro halogenovou žárovku.

Tělo a pouzdro na baterie jsou vyrobeny ze silného plastu, s deklarovaným krytím IP68 a vodotěsností do pěti metrů.

Svítilna byla představena v roce 2001 a díky nízké ceně a robustnímu provedení se dodnes těší velké popularitě. V posledních letech vzniklo několik projektů nahrazujících původní halogenovou žárovku za úspornější výkonové LED moduly.

#### 1.1.5 Petzl Nao

Nao, jedna z nejnovějších čelových svítilen firmy Petzl, jako jedna z prvních svítilen na trhu disponuje technologií Reactive Lighting — automatickou regulací jasu a tvaru paprsku dle množství odraženého světla. Tato technologie minimalizuje nutnost měnit manuálně výkon podle prostředí, v důsledku čehož klesá průměrná spotřeba.





Obr. 1.5: Svítílna Petzl Nao (převzato z [3])

Podobně jako Scurion obsahuje svítílna dvě Cree XM-L2 LED, jednu s optikou produkující široký paprsek pro osvětlení blízkého okolí a druhou s úzkým paprskem pro svícení do dálky. Světelný tok dosahuje hodnoty 575 lumenů.

Akumulátor je umístěn v samostatném pouzdře, lze použít jeden článek Li-Ion 18650 nebo dvojici článků velikosti AAA.

Svítílnu lze připojit pomocí rozhraní USB k počítači a v dodávaném programu nastavit až čtyři profily pro různé činnosti. Ovládání samotné pak probíhá pomocí otočného přepínače.

Svítílna je vyrobena z plastu s udávaným krytím IPX4. Díky malé odolnosti není Nao vhodná pro speleologii, ale technologie Reactive Lighting by pro pohyb v podzemí mohla být užitečná a proto Nao stojí za zmínku. Cena se pohybuje okolo 180 dolarů.

#### 1.1.6 DarkStar MkI

Tato svítílna byla mým prvním pokusem o levný a zároveň dostatečně výkonný světelný zdroj pro speleologii, turistiku a skalní lezení.



Obr. 1.6: Svítílna DarkStar

Základ tvoří mikroprocesor firmy Microchip PIC 16F616 řídící dva spínané snižující zdroje proudu pro moduly Cree XP-G2. Z důvodu nedostatečného chlazení je omezen výkon na obou LED na 2,5 W, což by dle dokumentace firmy Cree mělo odpovídat hodnotě 500 lumenů. Při měření v kulovém integrátoru byl naměřen světelný tok pouze 214 lumenů, který díky zahřívání postupně klesal až na hodnotu 208 lumenů.

O napájení se starají dva články Li-Ion 18650 zapojené paralelně. Ovládání probíhá pomocí otočné osy spínající dva mikrospínače, kterými lze nastavovat jas jednotlivých LED v pěti krocích. Při poklesu napětí baterie pod předem určenou úroveň dochází ke snížení výkonu na minimální hodnotu.

Tělo je vyrobeno z hliníkové slitiny 6082 třískovým obráběním. Bateriové pouzdro bylo vytištěno na 3D tiskárně z materiálu ABS. Hmotnost celku bez baterií se pohybuje okolo 125 gramů.

## 1.2 Základní požadavky na svítilnu

Na základě praktických zkušeností a průzkumu existujících řešení byly stanoveny následující základní požadavky na speleologickou svítilnu:

- ochrana proti vniknutí vody při ponoření (IPx8),
- vysoká mechanická odolnost,
- nízká hmotnost,
- vysoká spolehlivost,
- funkčnost v širokém teplotním rozsahu,
- dlouhá výdrž na baterie,
- vysoký světelný tok,
- široký kužel světla osvětlující prostor bezprostředně před uživatelem,
- úzký paprsek osvětlující vzdálené objekty,
- jednoduché a intuitivní ovládání.

### 1.2.1 Možnosti zlepšení stávajících řešení

Mimo svítilny Petzl Nao žádné ze zmíněných řešení nedisponuje automatickou regulací jasu, tato funkce je přitom při pohybu v podzemí výhodná, neboť eliminuje nutnost častých zásahů do ovládání. Maximální výkon automatické řízení aktivuje jen po dobu nezbytně nutnou, klesá tak průměrná spotřeba a prodlužuje se doba provozu.

Pouze svítilny Scurion a Petzl Nao obsahují možnost uživatelského nastavení jednotlivých módů svícení, nicméně toto nastavení neumožňuje přesnější konfiguraci funkcí spínačů, limitů výstupního výkonu, atd. U nové svítilny by bylo vhodné realizovat programovací mód pro nastavení různých parametrů jako jsou:

- počet přepínatelných režimů a výkony LED v každém režimu,
- minimální a maximální výstupní výkon pro automatickou regulaci jasu,
- snížení výkonu při poklesu napětí na zdroji pod nastavenou hodnotu,
- prohození funkcí tlačítek pro leváky,

- teplotní limit pro snížení výkonu,
- interval pro varování o vybitém akumulátoru.

Během několika měsíců používání první verze svítilny DarkStar se objevilo značné množství nedostatků, které jsou řešeny při návrhu nové svítilny:

- malý maximální světelný tok použitých LED, složitá výměna za jiný typ,
- velké zahřívání tranzistorů budiče díky spínacím ztrátám,
- nedostatečný odvod tepla od LED přes prokovené otvory,
- absence hlídání teploty chladiče a automatického snížení výkonu v případě přehřívání,
- nedostatečné informování uživatele o zbývajícím množství elektrické energie,
- fixně nastavené režimy svícení bez možnosti uživatelské konfigurace,
- nemožnost nastavit nižší světelný tok než přibližně 20 lumenů,
- nedostatečně mechanicky odolný kabel mezi svítilnou a akumulátorem.

### 1.2.2 Požadované technické parametry

Mimo základních požadavků zmíněných na začátku podkapitoly by svítilna měla mít i tyto vlastnosti:

- budiče LED dimenzované na minimální proud 2 A,
- účinnost budičů nad 85 %,
- automatické řízení jasu dle intenzity odraženého světla,
- hlídání teploty svítilny, omezení výstupního výkonu při přehřívání,
- signalizace stavu akumulátorů,
- uživatelsky programovatelné režimy ovládání svítilny,
- režim se světelným tokem v řádu jednotek lumenů, tzv. „měsíční režim“,
- uživatelsky vyměnitelná optika a moduly LED,
- odolnost proti přepólování napájení,
- automatické omezení výstupního výkonu na minimální hodnotu při vybité baterii místo vypnutí svítilny,
- oddělené pouzdro na akumulátory,
- eloxované hliníkové tělo,
- možnost instalovat mimo dvou hlavních bílých LED i červenou, nebo UV diodu,
- nízké elektromagnetické vyzařování,
- zanedbatelný odběr ve vypnutém stavu — není nutné odpojovat napájecí akumulátor.

## 2 PARAMETRY SVÍTIVÝCH DIOD

Svítové diody zaznamenaly v posledních desetiletích rychlý rozvoj a velké rozšíření ve spotřební elektronice. Rostoucí účinnost, ekologická nezávadnost a vysoké výkony je předurčují jako náhradu dříve používaných zdrojů světla.

Jelikož je intenzita a kvalita světelného výstupu svítidel její nejdůležitější parametr, je nutné zvážit při výběru konkrétní LED mnoho faktorů.

### 2.1 Světelný tok

Světelný tok je fotometrická veličina vyjadřující schopnost zářivého toku (energie procházející určitou plochou za jednotku času) způsobit zrakový vjem. Charakterizuje světelný výkon zdroje záření s přihlédnutím k citlivosti lidského oka. Jednotkou je lumen [6].

Výrobci se dnes předhánějí, kdo vyrobí svítidlo s větším světelným tokem. Dle praktických zkušeností z podzemí světelný tok okolo 200 lumenů naprosto dostačuje pro všechny běžné činnosti a vyšší hodnota je vyžadována jen sporadicky a krátkodobě, nejčastěji pro potřeby fotografování.

### 2.2 Měrný výkon

Měrný výkon udává účinnost přeměny elektrické energie na světelný tok, je definovaný jako poměr světelného toku  $\Phi$  a příkonu svítidla  $P_p$  [6]:

$$\eta = \frac{\Phi}{P_p} \quad (\text{lm/W}) \quad (2.1)$$

Maximální teoretická hodnota pro monochromatické světlo o vlnové délce 555 nm je 683 lm/W. U bílého světla, v závislosti na jeho spektrálním složení, se maximální dosažitelné hodnoty pohybují mezi 250 a 370 lm/W [7].

Měrný výkon určuje z velké části efektivitu celé svítidly, LED s vyšší hodnotou měrného výkonu spotřebuje při stejném světelném toku méně energie, než LED s hodnotou nižší. Při výběru tento parametr patří mezi jeden z nejdůležitějších. Nutno podotknout, že měrný výkon není konstantní hodnota, s rostoucí teplotou a proudem klesá [9].

V laboratorních podmínkách dosáhla v současnosti nejvyšší hodnoty světelného toku bílé LED firma Cree s hodnotou 303 lm/W [8].

### 2.3 Index podání barev

Spektrální složení světla má značný vliv na vnímání barev osvětlovaných předmětů. Míru shody vjemu barvy předmětu osvětleného smluvním zdrojem světla a testovaným zdrojem určuje index podání barev  $R_a$ , který nabývá hodnot od 0 do 100. Často je v literatuře označován jako *CRI* (color rendering index) [6].

Pro monochromatické světlo platí  $R_a = 0$ . Při takovém osvětlení nelze okem rozeznat barvy. LED jsou vyráběny v širokém rozsahu  $R_a$  s maximem dosahujícím hodnoty 98. Vzhledem k technologii výroby výkonových bílých LED klesá s rostoucí hodnotou  $R_a$  měrný výkon [9]. Při výběru LED je nutné zvolit kompromis mezi měrným výkonem a indexem podání barev.

Jako vhodný se jeví index okolo 80, při kterém se pokles měrného výkonu dle konkrétní LED pohybuje v jednotkách procent a zároveň není příliš narušeno vnímání barev. Tato hodnota  $R_a$  je také udávána v normě ČSN EN 12464-1 jako minimální pro trvale obsazená pracoviště.

## 2.4 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti  $T_c$ , též barevná teplota, popisuje barevné vlastnosti světelného zdroje. Odpovídá teplotě absolutně černého tělesa, jehož záření má stejnou chromatičnost jako uvažované záření. Udává se v kelvinech. Pokud křivka spektrálního složení světelného zdroje vykazuje prudké změny jako u bílých LED, používá se tzv. náhradní teplota chromatičnosti [6].

Světlo s nízkou hodnotou  $T_c$  má červený nádech a je označováno jako teplé, vyšší hodnoty přecházející do modré jsou označovány jako studené světlo. Obvyklé denní světlo odpovídá hodnotě 5000 K (obrázek 2.1). Teplejší světlo je ve studeném podzemí subjektivně příjemnější.



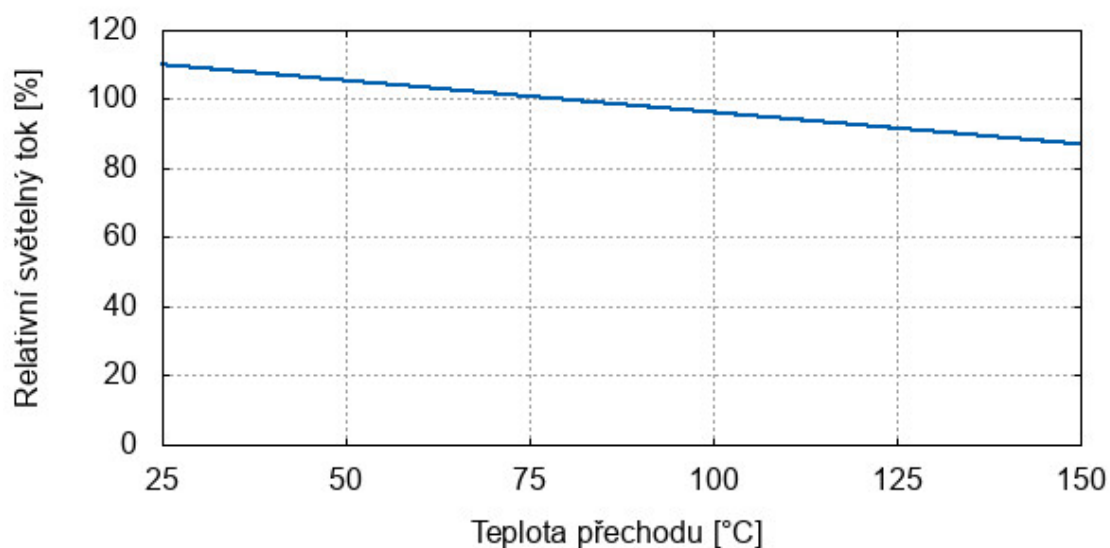
Obr. 2.1: Teploty chromatičnosti (převzato z [10])

Bílá barva světla u výkonových LED je dosahována převážně pomocí modré LED a žlutého luminoforu, který převádí část modrého světla na záření vzniklé fotoluminiscencí. S rostoucí tloušťkou vrstvy luminoforu klesá  $T_c$  a světelný tok [5]. Spektrum bílé LED má výrazný vrchol v oblasti modré barvy (450 nm).

## 2.5 Teplotní charakteristiky

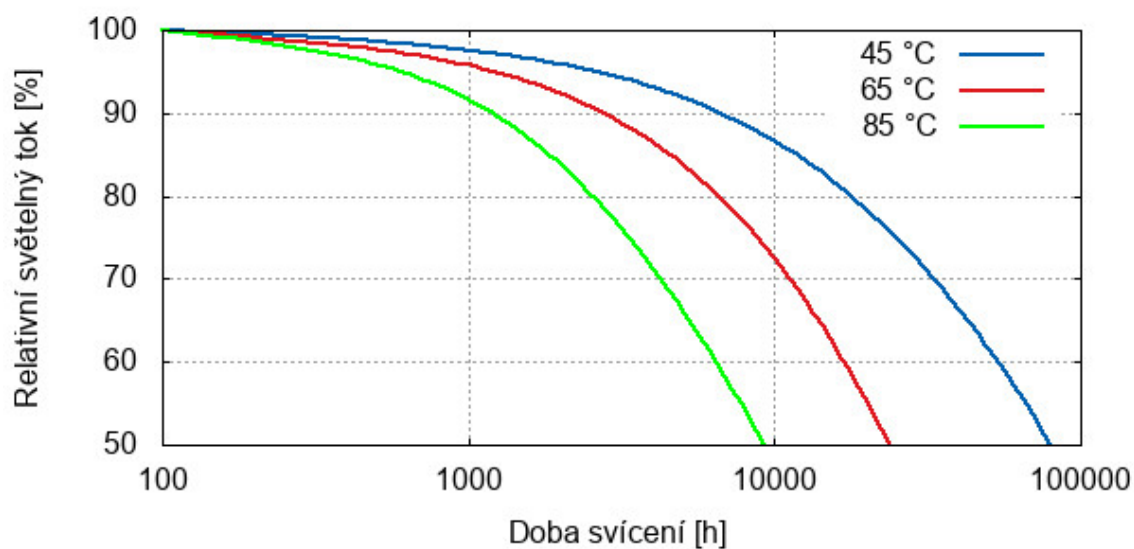
Přeměna elektrické energie na světelnou není bezztrátová, velká část se přemění v teplo a způsobí zahřívání čipu LED. Účinnost přeměny energie se pohybuje dle typu mezi 40–50 % [11]. Se vzrůstající teplotou čipu dochází k poklesu světelného toku a tedy i měrného výkonu (obrázek 2.2). Změny barevné teploty a  $R_a$  jsou běžně zrakem nepostřehnutelné.

Teplota polovodičového přechodu také ovlivňuje životnost LED, která je udávána jako doba, po které poklesne světelný tok na 70 % původní hodnoty při konstantním proudu



Obr. 2.2: Závislost relativního světelného toku na teplotě přechodu bílé LED (upraveno z [9])

a teplotě. Dle použité LED životnost při teplotách pod 100 °C dosahuje tisíců hodin. Typický pokles světelného toku s věkem ukazuje obrázek 2.3.



Obr. 2.3: Ovlivnění životnosti LED pracovní teplotou (upraveno z [5])

Výrobce LED Cree udává v technické dokumentaci světelný tok pro teplotu přechodu 85 °C. Při návrhu chlazení je vhodné počítat s touto hodnotou jako maximální přípustnou z důvodu udržení maximální efektivity a životnosti celého zapojení. Nejvyšší možná teplota přechodu závisí na konkrétní LED, např. u Cree XP-L2 je rovna 150 °C.

## 2.6 Výběr konkrétní LED

Na základě výše uvedených parametrů byly stanoveny základní požadavky na LED:

- $R_a \geq 80$ ,
- $T_c$  - neutrální bílá 4500 K a nižší,
- Maximální světelný tok  $\geq 200$  lm.

Z důvodu minimalizace napájecího napětí byly zvažovány pouze LED s jednou interní diodou. Výrobci v jedné modelové řadě vyrábějí větší množství variant lišící se dle použitého luminoforu barevnou teplotou, indexem podání barev a měrným výkonem. Z tohoto důvodu byly modely LED porovnávány nikoliv podle maximálních udávaných hodnot měrného výkonu, ale podle hodnot dosahovaných při zvoleném  $R_a$ ,  $T_c$  a teplotě přechodu 85 °C. Ostatní hodnoty, jako je maximální světelný tok, bohužel výrobci uvádí pouze jako maximální hodnotu ze všech variant konkrétního modelu. Hodnoty důležitých parametrů pro vybrané LED shrnuje tabulka 2.1.

Tabulka 2.1: Porovnání parametrů vybraných LED

Výrobce	Řada	Vybraný $\eta$ [lm/W]	Max. $\eta$ [lm/W]	Max. $\Phi$ [lm]	Max. proud [mA]
Cree	XP-L2	160	186	1175	3000
Cree	XP-G3	156	190	777	2000
Luxeon	L1T2	143	159	369	1000
Cree	XT-E	139	178	629	1500
Cree	XM-L2	130	170	1052	3000

Z porovnání plyne, že ve svítelnách nejrozšířenější XM-L2 má při zvolených parametrech nejvyšší měrný výkon z vybraných LED, ale díky vysokému maximálnímu příkonu má vysoký maximální světelný tok.

Protože důležitým hlediskem při návrhu svítilny je minimalizace spotřeby, byla vybrána dioda s nejvyšším měrným výkonem — XP-L2 vydaná firmou Cree v roce 2016, konkrétně varianta XPLBWT-00-0000-000HV445G.

Napětí v propustném směru této LED se pohybuje od 2,5 V do 3,12 V (při 3 A), maximální dovolený proud je 3 A.  $R_a$  je nejméně 80, barevná teplota je 4500 K [9].

### 3 SPÍNANÉ BUDIČE LED

K řízení výkonových LED jsou používány DC/DC měniče transformující napětí zdroje na napětí vhodné pro LED.

Principiálně nejjednodušší jsou budiče lineární, které vytvářejí úbytek napětí na rezistoru nebo polovodičovém přechodu. Ztráty jsou rovny součinu protékajícího proudu a rozdílu napětí mezi vstupem a výstupem měniče. Výhodou je jednoduchost obvodového řešení a minimální elektromagnetické (EM) rušení. Díky vysokým ztrátám a zahřívání regulačního prvku nejsou vhodné pro bateriově napájené svítidly a nebudou dále rozebírány.

Výhodnějším řešením jsou budiče spínané, které dosahují účinnosti přes 90 % a umožňují i zvyšování napětí. Nevýhodou je vyšší obvodová složitost, vyšší zvlnění napětí (potažmo proudu) na výstupu a vznik EM rušení [17].

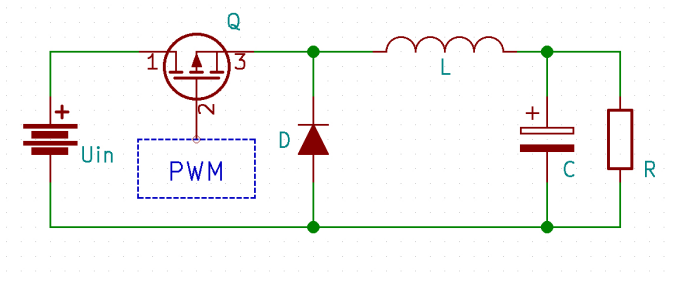
#### 3.1 Základní topologie spínaných DC/DC měničů

##### 3.1.1 Snižující měnič

Snižující měnič, v anglické literatuře označován jako „buck“, snižuje vstupní napětí na nižší hodnotu. Výstupní proud je vyšší než vstupní.

Princip ukazuje schéma na obrázku 3.1. V první fázi přes sepnutý tranzistor Q a cívku L protéká proud, část proudu nabíjí kondenzátor C, zbytek protéká zátěží R. Proud protékající cívku způsobuje ukládání energie do magnetického pole cívky.

Ve druhé fázi je tranzistor Q rozeprt. Cívka L se chová jako zdroj a proud teče přes cívku L, spotřebič R a diodu D, která je nyní polarizovaná v propustném směru. Výstupní napětí (potažmo proud) určuje střída PWM signálu, který spíná tranzistor Q [17].



Obr. 3.1: Snižující měnič

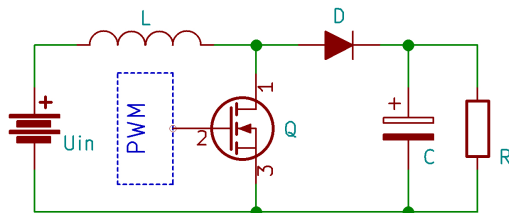
##### 3.1.2 Zvyšující měnič

Zvyšující měnič, v anglické literatuře označován „boost“, zvyšuje výstupní napětí na úkor proudu.

Typické zapojení měniče ukazuje obrázek 3.2. V první fázi je tranzistor Q sepnut, proud teče cívku L, v jejímž magnetickém poli je akumulována energie. Dioda D zabraňuje vybíjení kondenzátoru C do cívky.



Po rozeznutí tranzistoru se cívka stává zdrojem, napětí na cívce je sečteno s napětím napájecího zdroje, proud teče přes diodu D a nabíjí kondenzátor C. Kondenzátor je tak nabíjen na napětí vyšší než je napětí zdroje [17].



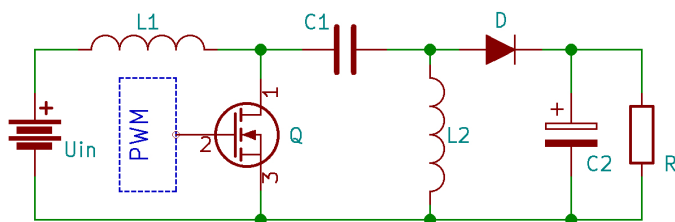
Obr. 3.2: Zvyšující měnič

### 3.1.3 SEPIC

Zapojení SEPIC (Single-ended primary-inductor converter) umožňuje zvyšování i snižování napětí, což je výhodné např. u zařízení napájených akumulátorem, kdy vstupní napětí může být nad i pod úrovní požadovaného výstupního napětí. Jednodušší zapojení typu „buck-boost“ výstupní napětí invertuje, u typu SEPIC ke změně orientace nedochází [17].

Typické zapojení měniče ukazuje obrázek 3.3. Při sepnutém tranzistoru Q protéká cívkou L1 a L2 narůstající proud, současně dochází k vybíjení kondenzátoru C1, který byl před sepnutím nabit na napětí zdroje  $U_{in}$ . Dioda D je polarizována v závěrném směru a zátěž R je napájena kondenzátorem C2.

Po rozeznutí tranzistoru Q teče proud cívky L1 přes kondenzátor C1 a diodu D a spolu s proudem tekoucím přes cívku L2 nabíjí kondenzátor C2.



Obr. 3.3: SEPIC měnič

## 3.2 Hysterezní řízení

Hysterezní řízení je založeno na udržování konstantního zvlnění výstupního napětí (popř. proudu). Princip bude vysvětlen na jednoduchém snižujícím měniči.

Základní schéma snižujícího měniče s proudovým hysterezním řízením je na obrázku 3.4. Při vzrůstu proudu diodou D2 roste úbytek na rezistoru R. V okamžiku, kdy tento úbytek překročí referenční napětí komparátoru, dojde k negaci výstupu komparátoru,

Spínací frekvenci ovlivňuje velké množství parametrů, jako vstupní a výstupní napětí, velikost hysterezního okna komparátoru, indukčnost použité cívky, kapacita a sériový odpor (ESR) kondenzátoru připojeného paralelně k zátěži, atd. Proto nelze spínací frekvenci přesně určit, ale jen přibližně odhadnout.

$$f = \frac{1}{I_{rip} L \left( \frac{1}{U_{in} - U_{out}} + \frac{1}{U_{out}} \right)} \quad (3.1)$$

Kde  $U_{in}$  je vstupní napětí měniče,  $U_{out}$  výstupní napětí,  $L$  indukčnost použité cívky a  $I_{rip}$  je zvlnění proudu udržované komparátorem.

### 3.3.1 Ztráty na polovodičových součástkách

Ztráty způsobené vodivostí součástky v sepnutém stavu jsou závislé na protékajícím proudu, úbytku napětí a na době v sepnutém stavu. Dobu v sepnutém stavu lze udávat střídou  $D$  (poměr doby sepnutí a celkové doby periody spínacího signálu). U diody jsou

ztráty dány napětím v propustném směru  $U_F$ , u tranzistoru MOSFET odporem kanálu  $R_{DSon}$  [18]:

$$P_{conFET} = I^2 R_{DSon} D \quad (3.2)$$

$$P_{conD} = I \cdot U_F \cdot (1 - D) \quad (3.3)$$

Druhou složkou ztrát jsou ztráty vznikající při sepnutí a rozepnutí daného prvku. Spínací ztráty tranzistoru určuje napětí drain-source  $U_{DS}$  v rozepnutém stavu, výstupní proud  $I_D$ , spínací frekvence  $f_s$ , náboj nutný k nabití kapacit elektrody gate  $Q_{SW}$  a proud  $I_g$ , který dodá budič tranzistoru [18]:

$$P_{swFET} = U_{DS} I_D f_s \frac{Q_{SW}}{I_g} \quad (3.4)$$

Malá část energie je také spotřebována při nabíjení a vybíjení kapacity elektrody gate, ve většině případů může být díky malé kapacitě gate zanedbána, je uvedena pouze pro úplnost. Konkrétní hodnota závisí na frekvenci, náboji a napětí na gate  $U_G$  [18]:

$$P_{gate} = f_s Q_{SW} U_G \quad (3.5)$$

Největší ztráty při spínání diody nastávají při přechodu z propustného do závěrného směru, kdy se musí vybit kapacita přechodu. Vybíjení se projeví jako proudová špička v závěrném směru. Ztráty jsou dány nábojem  $Q_{RR}$  nutným k rozepnutí diody, připojeným napětím  $U_R$  a spínací frekvencí  $f_s$  [18].

$$P_{swD} = U_R Q_{RR} f_s \quad (3.6)$$

Ztráty na diodě se dají omezit nahrazením diody tranzistorem, pak se jedná o tzv. synchronní měnič, nevýhodou tohoto řešení je vyšší konstrukční složitost a vyšší spínací ztráty, proto se vyplatí až při vyšších výkonech.

### 3.3.2 Ztráty na induktoru

Ztráty na induktoru se skládají ze ztrát v jádře (vířivé proudy, hysterezní ztráty) a ztrát na stejnosměrnému odporu cívky ( $DCR$ ):

$$P_{Ldcr} = I^2 DCR \quad (3.7)$$

Ztráty v jádře rostou se spínací frekvencí a amplitudou oscilací proudu okolo střední hodnoty. Přesná hodnota je ovlivněna mnoha faktory a její výpočet je uváděn v dokumentaci ke konkrétnímu typu induktoru.

## 4 NAPÁJECÍ ZDROJE

Napájecí zdroj spolu s použitou LED určuje celkovou dobu svícení čelové svítilny. Napětí zdroje a napětí LED v propustném směru pak definuje základní požadavky na řídicí elektroniku, proto je nutné věnovat jeho výběru značnou pozornost.

### 4.1 Primární články

Primární článek je zdroj elektrické energie založený na nevratné chemické reakci. Nelze tedy opakovaně nabíjet, což ho činí z ekonomických důvodů nevhodným pro použití v přenosných svítilnách s velkým proudovým odběrem.

Výhodou primárních článků je nízká cena a dobrá dostupnost. Mohou tak být použity např. při zapomenutí nabíječky, nebo jako nouzový zdroj energie při vybití primárního akumulátoru. Zároveň jsou tyto články díky nízkému samovybíjení vhodné do sporadicky používaných záložních svítilen.

### 4.2 Akumulátory

Akumulátory jsou zdroje elektrické energie založené na vratné chemické reakci, je možné je opakovaně nabíjet, což snižuje ekologickou zátěž prostředí a náklady na provoz svítily.

Výběr ovlivňují především parametry jako měrná hustota energie (energie na kilogram), jmenovité napětí, proudová zatížitelnost, velikost a životnost akumulátoru. Proudová zatížitelnost bývá uváděna nejčastěji v násobcích kapacity, např. 2 C u akumulátoru s kapacitou 2200 mAh odpovídá maximálnímu proudu 4400 mA.

V tabulce 4.1 ([12], [13]) jsou uvedeny parametry běžných typů akumulátorů, záměrně nejsou zmíněny olověné akumulátory kvůli jejich nízké měrné hustotě energie. Běžný proudový odběr u Li-Pol akumulátorů se pohybuje okolo 1–2 C, některé druhy ale dovolují odběr v desítkách C na úkor měrné hustoty energie [14].

Tabulka 4.1: Přehled parametrů různých typů akumulátorů

	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Pol	LiFePo <sub>4</sub>
Měrná hustota [Wh/kg]	45-80	60-120	150-260	150-260	90-120
Jmenovité napětí [V]	1,2	1,2	3,6	3,6	3,3
Pracovní teplota [°C]	-20 až 65	-20 až 65	-20 až 60	-20 až 60	-20 až 60
Zatížitelnost [C]	20	5	1-2	>30	1
Životnost [cyklů]	1000	300-500	500-1000	1000	1000-2000
Samovybíjení [%/měsíc]	20	30	<5	<5	<5
Ochranný obvod	ne	ne	ano	ano	ne

Dle tabulky 4.1 se jako nejvhodnější jeví Li-Ion a Li-Pol články díky své vysoké měrné hustotě energie a jmenovitému napětí, které je vyšší než napájecí napětí vybrané LED.

Vyšší jmenovité napětí také eliminuje nutnost sériového řazení článků a řešení jejich balancování.

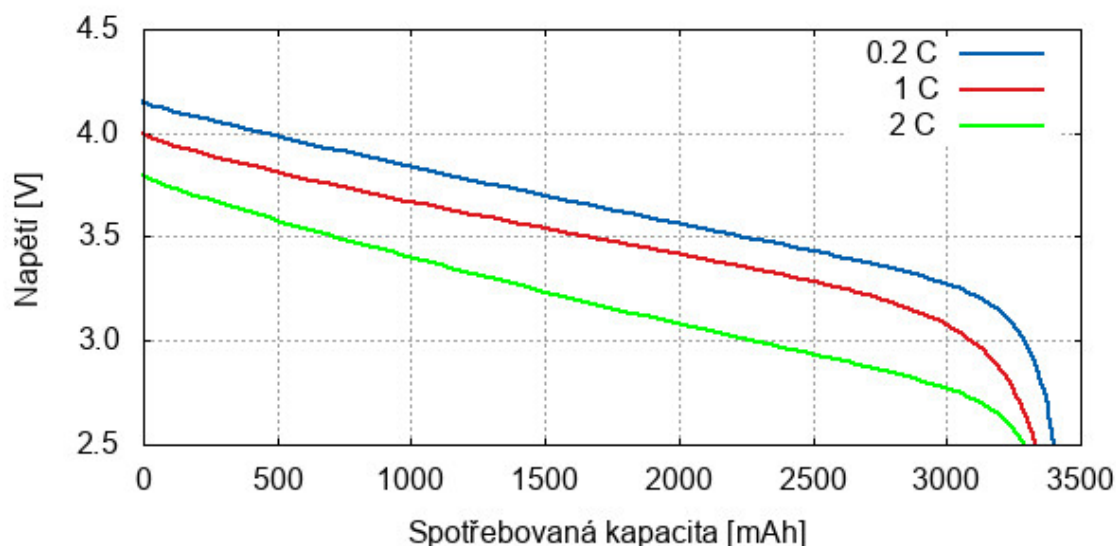
Nevýhodou obou zvažovaných typů je malá odolnost proti nadproudu a přepětí, při kterých dochází k trvalému poškození akumulátoru, které může skončit jeho vzplanutím. Proto je nutné používat ochrannou elektroniku, která zabraňuje překročení provozních parametrů akumulátorů.

Li-Pol jsou díky měkkému obalu náchylné na mechanické poškození, při zatěžování větším proudem a při stárnutí může docházet k postupnému nafukování akumulátoru (běžná známka blížícího se konce životnosti Li-Pol baterie). Li-Ion jsou vyráběny s kovovým, mechanicky odolným a rozměrově stálým válcovým tělem, proto jeví jako nejvhodnější zdroj energie pro svítidlu.

### 4.3 Parametry vybraného akumulátoru

Byl zvolen akumulátor Panasonic NCR18650B v průmyslovém provedení, který s kapacitou 3350 mAh a hmotností 48,5 gramů ([16]) patří mezi nejlepší dnes dostupné Li-Ion články. Jeho přímý předchůdce NCR18650A byl použit jako zdroj pro experimentální letoun s elektrickým pohonem VUT 051 RAY [15].

Napětí vybraného Li-Ion akumulátoru se pohybuje mezi 4,2 V v plně nabitém stavu a 2,5 V ve vybitém stavu. Pod 3 V klesá při spotřebování průměrně 90 % energie (v závislosti na odebíraném proudu a teplotě — obrázek 4.1).



Obr. 4.1: Vybití křivky NCR18650B pro různé proudy (upraveno z [16])

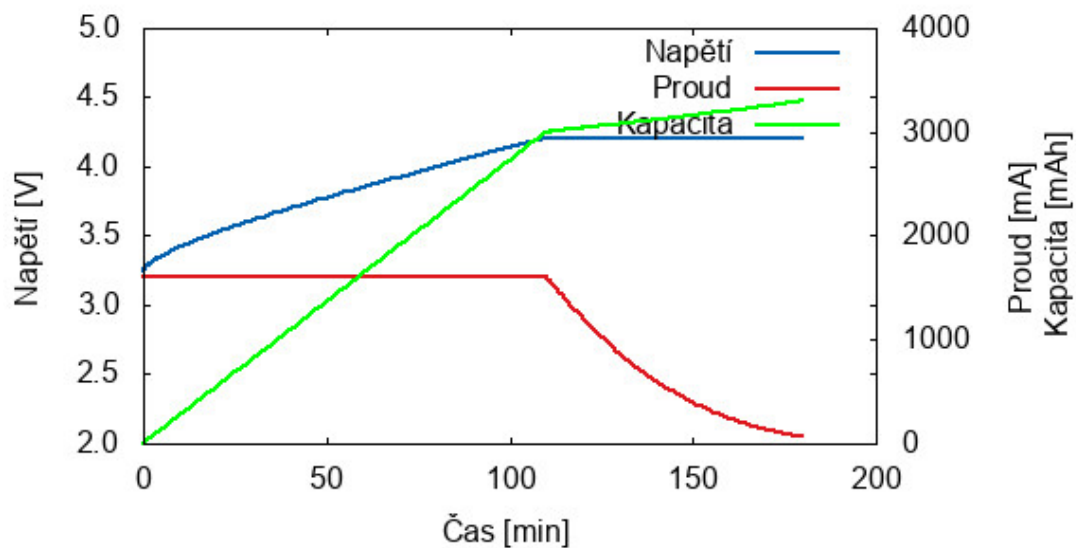
Maximální vybití proud 2 C (6,7 A) převyšuje maximální dovolený proud pro dvě Cree XP-L2 (2x 3 A), k napájení svítidly je tak možné použít pouze jeden článek.

Teplota v podzemí se s výjimkou ledových jeskyní pohybuje nad bodem mrazu. Při těchto teplotách nepřesahuje pokles kapacity akumulátoru 10 % ([16]) a není tedy nutné

řešit tepelnou izolaci napájecího zdroje.

## 4.4 Nabíjení Li-Ion

Li-Ion akumulátory se nabíjejí v první fázi konstantním proudem, po dosažení cílového napětí (4,2 V u NCR18650B) přechází nabíjecí obvod do režimu konstantního napětí. Nabíjení je ukončeno při poklesu nabíjecího proudu pod stanovenou hodnotu (65 mA), viz obrázek 4.2.

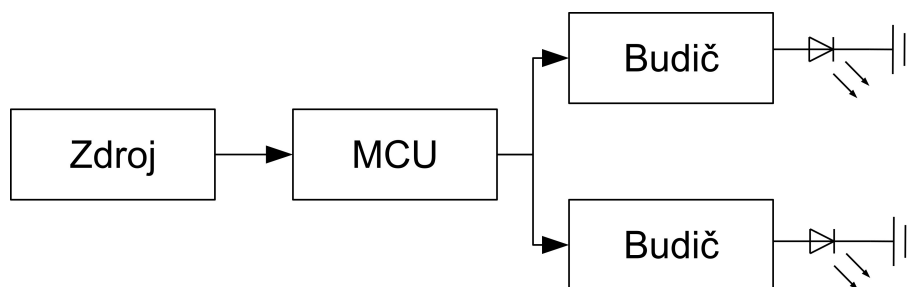


Obr. 4.2: Nabíjení Li-Ion (upraveno z [16])

## 5 NÁVRH ZAPOJENÍ A VÝBĚR SOUČÁSTEK

Elektronika svítilny se skládá ze tří základních modulů (blokové schéma na obrázku 5.1):

- 2x spínaný budič LED,
- řídicí mikroprocesor,
- napájecí zdroj.



Obr. 5.1: Blokové schéma svítilny

Jednotlivé moduly je nutné maximálně zjednodušit pro snížení rozměrů a tedy i hmotnosti výsledné svítilny. Zároveň musí být návrh přizpůsoben pro dosažení co nejvyšší účinnosti kvůli prodloužení provozní doby na baterie. Při návrhu rovněž musí být zaručena spolehlivost výsledného zapojení.

Ovládání je realizováno dvojicí mikrospínačů, mikroprocesor zpracovává signál ze spínačů a na základě vnitřní logiky nastavuje výstupní proud jednotlivých spínaných budičů, ke kterým jsou připojeny výkonové LED.

Ve vypnutém stavu bude mikroprocesor v režimu spánku s minimální spotřebou, což eliminuje nutnost fyzického odpojení akumulátoru v době, kdy svítilna není používána.

### 5.1 Budič LED

#### 5.1.1 Výběr topologie

Napětí na Li-Ion akumulátoru se pohybuje v rozmezí 2,5 až 4,2 V, pod 3 V klesá až při spotřebování přibližně 90 % energie [16]. Vybraná LED pracuje od 2,5 V, maximální pracovní napětí je 3,12 V [9].

Z výše uvedených hodnot napětí vyplývá nutnost použít SEPIC nebo snižující měnič. Po většinu vybíjecího cyklu je napěťový rozdíl mezi akumulátorem a LED dostatečný pro správnou funkci snižujícího měniče, jehož výhody převažují nad složitějším SEPIC zapojením. Při vybitém akumulátoru může spínací tranzistor zůstat trvale v sepnutém stavu a umožnit tak využít v nouzové situaci i poslední zbytky energie.

Z výše uvedených důvodů byl zvolen spínaný zdroj ve snižujícím režimu.

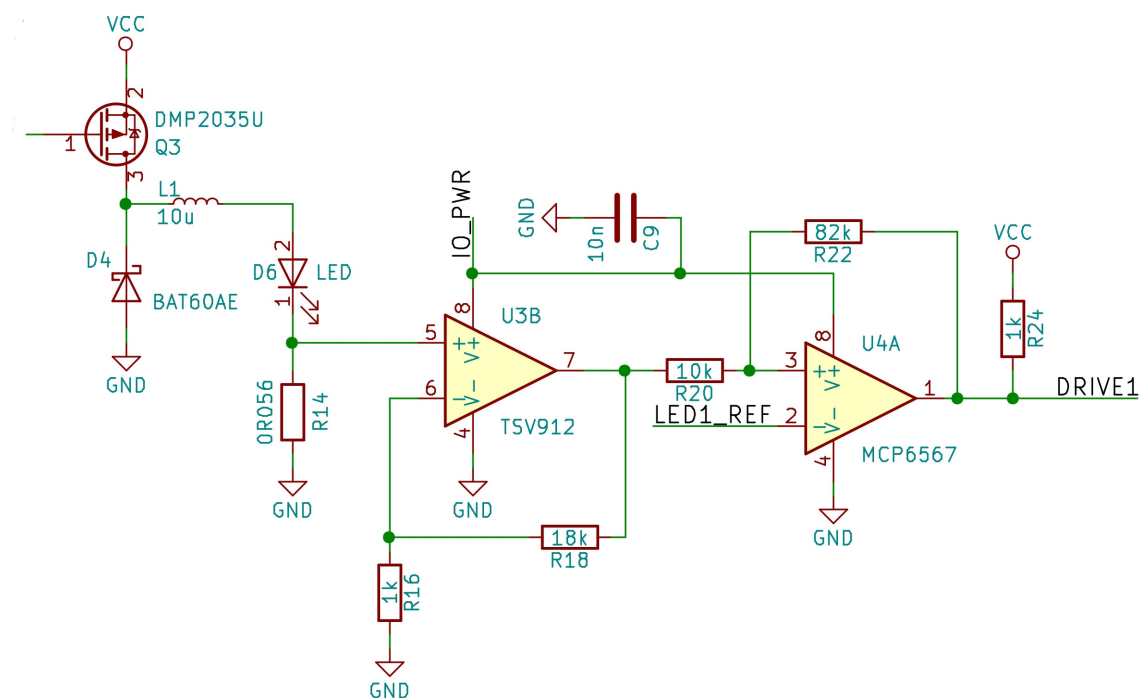
### 5.1.2 Návrh zapojení

Na trhu existuje velké množství integrovaných obvodů pro řízení LED, bohužel snižující a SEPIC budiče pro jednu LED s minimálním napájecím napětím pod 3 V a výstupním proudem okolo 2 A se téměř nevyskytují.

Dostupnějším řešením je snižující DC/DC měnič s upravenou zpětnou vazbou (např. úbytek napětí na snímacím rezistoru daný proudem protékajícím zátěží je zesílen a výsledný signál slouží jako zpětná vazba měniče).

Ze studijních důvodů byl zvolen návrh vlastní konstrukce budiče LED založený na hysterezním snižujícím DC/DC měniči s proudovou zpětnou vazbou. Toto řešení umožňuje hlouběji pochopit funkci měniče a provést optimalizaci návrhu pro minimalizaci ztrát. Zároveň eliminuje závislost na konkrétním obvodu budiče LED a dobře, po jakou bude tento obvod ještě vyráběn. Nevýhodou je vyšší počet součástek a proměnná pracovní frekvence. Finanční náročnost bude srovnatelná s monolitickým integrovaným budičem.

Navržené zapojení je na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Schéma navrhovaného budiče

### 5.1.3 Základní parametry

Zvolení pracovní frekvence měniče do značné míry ovlivní cenu součástek a velikost výsledného zapojení. Tato frekvence by se měla pohybovat mimo slyšitelné pásmo nejen člověka, ale vzhledem ke speleologickému zaměření i mimo sluchový rozsah netopýrů, kteří v jeskyních přezimují. Nejvyšší slyšitelná frekvence se u netopýrů pohybuje nejčastěji okolo 110 kHz, některé druhy slyší až do 200 kHz [19], ty jsou ale v České republice vzácné.



S rostoucí pracovní frekvencí klesá velikost induktoru při stejném výstupním zvlnění, ale rostou spínací ztráty a nároky na kvalitu použitých součástek (šířku pásma operačních zesilovačů, rychlost přeběhu, atd.), proto roste i výsledná cena zařízení.

Byla zvolena maximální pracovní frekvence 250 kHz, která s rezervou překračuje pásmo slyšitelnosti netopýrů, umožňuje použít relativně malé hodnoty indukčnosti a při které jsou spínací ztráty přijatelné (viz další podkapitola). Díky funkčnímu principu hysterezního měniče nebude frekvence stálá, ale bude se měnit se zátěží a napájecím napětím.

Dalším důležitým parametrem je maximální proud budiče. Vybraná LED je uzpůsobena pro průchod proudu o velikosti maximálně 3 A. Při reálném provozu se proud bude pohybovat v hodnotách do 2 A kvůli snížení rizika poškození LED nadproudem, omezení množství vznikajícího tepla a udržení přijatelného měrného výkonu. Budič bude dimenzován na trvalé zatížení proudem 2 A.

Při výpočtu maximálního výkonového zatížení součástek je nutné znát střidu spínacího signálu, která závisí na velikosti vstupního  $U_{in}$  a výstupního  $U_{out}$  napětí a účinnosti měniče  $\eta$ . Při odhadu výsledné účinnosti 90 % bude minimální střida [20]:

$$D = \frac{U_{OUTmin}}{\eta U_{INmax}} = \frac{2,5}{0,9 \cdot 4,2} = 66 \% \quad (5.1)$$

Při běžných provozních podmínkách, tedy při poklesu napětí na akumulátoru z 4,2 V na nominálních 3,7 V vzroste střida na 75 % a se zvyšujícím se proudem LED dále poroste. Většina vodivostních ztrát bude na spínacím tranzistoru a ztráty na diodě budou minimální, proto není nutné uvažovat synchronní zapojení měniče.

Základní parametry pro návrh měniče jsou:

- maximální proud 2 A,
- rozsah vstupních napětí 4,2–3 V,
- rozsah výstupních napětí 2,5–3,1 V,
- maximální spínací frekvence 250 kHz.

Správná funkce zapojení a vliv parametrů jednotlivých součástek na stabilitu a účinnost byl odsimulován v programu LTspice.

#### 5.1.4 Induktor

Pro minimalizaci ztrát induktoru je nutné uvažovat stejnosměrný odpor vinutí (DCR) a ztráty v jádře. Ztráty v jádře bohužel výrobci často neudávají. Obvykle se vyskytuje pouze údaj o použitém materiálu jádra a frekvenci vlastní rezonance (SRF), která by měla být minimálně o řád vyšší než pracovní frekvence měniče.

Induktor bude rozměrově největší součástka ve svítilně, proto je vhodné jeho velikost co nejvíce omezit.

Hodnota indukčnosti je závislá na spínací frekvenci  $f_s$ , vstupním a výstupním napětí a maximálním přípustném zvlnění výstupního proudu  $\Delta I_L$ . Zvlnění se dle [20] volí mezi

20–40 %. Pro výpočet bylo zvoleno 20 %, požadovaná indukčnost bude [20]:

$$L = \frac{U_{out}(U_{in} - U_{out})}{\Delta I_L f_s U_{in}} = \frac{2,5 \cdot (4,2 - 2,5)}{0,4 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 4,2} = 10 \mu\text{H} \quad (5.2)$$

Špičkový proud v zapojení pak bude:

$$I_{peak} = I_{max} + \frac{\Delta I_L}{2} = 2 + \frac{0,4}{2} = 2,2 \text{ A} \quad (5.3)$$

Induktor musí být dimenzován na trvalý proud 2 A a saturační proud musí být vyšší než špičkový proud 2,2 A. Pro omezení EM rušení byl zvolen stíněný induktor SRU8043-100Y firmy Bourns s indukčností 10  $\mu\text{H}$ .

S tolerancí 30 % může reálná indukčnost klesnout až k 7  $\mu\text{H}$ , zvlnění vzroste na 0,58 A, což je stále pod 30 % maximálního proudu. Navíc tato situace může nastat pouze v případě největší přípustné odchylky induktoru a největším rozdílu napájecího napětí. Použití vybraného induktoru je tedy přípustné.

Pro zvlnění 0,6 A a frekvenci 250 kHz udává výrobce ztráty v jádře přibližně 100 mW, při odporu vinutí 30 m $\Omega$  bude maximální ztráta na induktoru:

$$P_L = I_{max}^3 R_{DSon} + P_{Lsw} = 2^2 \cdot 0,03 + 0,1 = 0,22 \text{ W} \quad (5.4)$$

Tato ztráta je maximální teoretická, při reálném provozu bude výrazně nižší.

### 5.1.5 Spínací dioda

Pro minimalizaci ztrát je nutné vybrat diodu s co nejnižším napětím v propustném směru  $U_F$  a krátkou dobou zotavení. Z tohoto důvodu jsou ve spínacích měničích používány převážně Schottkyho diody.

Maximální průměrný proud diodou bude:

$$I_F = I_{max} \cdot (1 - D) = 2 \cdot (1 - 0,66) = 0,68 \text{ A} \quad (5.5)$$

Vybraná dioda musí snést trvalé zatížení proudem 0,68 A a špičkový proud až 2,2 A.

Byla zvolena Schottkyho dioda s označením BAT 60A E6327 splňující automobilovou normu AEC Q101. Úbytek v propustném směru při proudu 2 A je 370 mV.

Maximální výkonová ztráta se zanedbáním spínacích ztrát (u Schottkyho diody při použité frekvenci jednotky mW) bude:

$$P_{conD} = I_{max} \cdot U_F \cdot (1 - D) = 2 \cdot 0,37 \cdot (1 - 0,66) = 0,25 \text{ W} \quad (5.6)$$

### 5.1.6 Spínací tranzistor

Největší ztráty u snižujícího měniče vznikají na spínacím tranzistoru, který vede proud nadpoloviční část periody. Při malém rozdílu vstupního a výstupního napětí může být tranzistor i trvale sepnutý. Proto je nutné vybrat tranzistor s nízkým odporem v sepnutém stavu. U tranzistorů MOSFET se tento odpor označuje  $R_{DSon}$ . Ztráty na tranzistoru by

neměly překročit 5 % maximálního výkonu na zátěži (přibližně 6 W při 2 A), tedy 0,3 W. Pro maximální odpor v sepnutém stavu pak platí:

$$R_{DSon} = \frac{P_{max}}{I_{max}^2} = \frac{0,3}{2^2} = 75 \text{ m}\Omega \quad (5.7)$$

Druhým důležitým parametrem při výběru je kapacita elektrody gate, která do značné míry určuje spínací ztráty tranzistoru a která by měla být co nejnižší.

Na základě výše uvedených skutečností byl zvolen tranzistor DMP2035U firmy Diodes INC splňující normu AEC-Q101 automobilového průmyslu.

Odpor v sepnutém stavu není konstantní veličina, výrazně závisí na teplotě tranzistoru, napětí  $U_{GS}$ , proudu  $I_D$ , atd. Na základě dokumentace výrobce se bude pohybovat při uvažovaných pracovních parametrech okolo 40 m $\Omega$ , čemuž odpovídají vodivostní ztráty:

$$P_{FET} = I_{max}^2 R_{DSon} = 2^2 \cdot 0,04 = 0,16 \text{ W} \quad (5.8)$$

Pro minimalizaci spínací ztrát bude tranzistor buzen obvodem ZXGD3001E6TA, který při vstupním proudu 10 mA dodává špičkový proud až 4,2 A. Odpor elektrody gate tranzistoru je dle výrobce 9,45  $\Omega$ , výstupní napětí budiče je o 0,4 V nižší než napájecí, nejnižší budící proud tak bude při téměř vybitém akumulátoru dle Ohmova zákona:

$$I_{budic} = \frac{U_{min} - 0,4}{R_{gate}} = \frac{3 - 0,4}{9,45} = 275 \text{ mA} \quad (5.9)$$

Maximální spínací ztráty při udávaném náboji na gate 15,4 nC jsou:

$$P_{swFET} = U_{DS} I_D f_s \frac{Q_{SW}}{I_{budic}} = 4,2 \cdot 2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot \frac{15,4 \cdot 10^{-9}}{0,275} = 0,12 \text{ W} \quad (5.10)$$

Konečně pro ztráty způsobené nabíjením a vybíjením kapacity gate platí:

$$P_{gate} = f_s Q_{SW} U_G = 250 \cdot 10^3 \cdot 15,4 \cdot 10^{-9} \cdot 4,2 = 16 \text{ mW} \quad (5.11)$$

Skutečné spínací ztráty se budou pohybovat pod 100 mW, protože s klesajícím napětím akumulátoru klesá nejen budící proud, ale i napětí  $U_{DS}$ .

### 5.1.7 Řídící obvod měniče

Proud protékající LED bude snímán rezistorem, úbytek napětí na tomto rezistoru bude zesílen operačním zesilovačem a přiveden na komparátor, kde bude napětí odpovídající proudu LED porovnáváno s referenčním napětím (generováno řídicím mikroprocesorem).

Operační zesilovač umožňuje použít snímací rezistor o malém odporu a snížit tak výkonové ztráty na tomto rezistoru. Z důvodu minimalizace ceny součástek bylo zvoleno maximální zesilované napětí 100 mV, které dovoluje použít levné operační zesilovače s napětovou nesymetrií okolo 1 mV. Tomuto napětí odpovídá rezistor o hodnotě:

$$R = \frac{U}{I_{max}} = \frac{0,1}{2} = 50 \text{ m}\Omega \quad (5.12)$$

Přestože existují i rezistory s touto hodnotou, byla z důvodu snížení ceny zařízení zvolena dostupnější hodnota 56 mΩ. Maximální výkonová ztráta na tomto rezistoru bude:

$$P_{Rsense} = I_{max}^2 R = 2^2 \cdot 0,056 = 0,224 \text{ W} \quad (5.13)$$

Z důvodu zvýšení spolehlivosti a životnosti zařízení bude použit rezistor s udávanou maximální ztrátou 0,5 W při teplotě okolí 70 °C.

Úbytek na rezistoru bude zesílen operačním zesilovačem tak, aby 1 V odpovídal přibližně proudu 1 A, tedy 20x. Vzhledem k použití rezistorů standardní řady E12 bude reálná hodnota zesílení 19 — nejbližší dosažitelné celočíselné zesílení neinvertujícího zapojení. Při frekvenci 250 kHz je minimální tranzitní kmitočet ( $GBW$ , součin frekvence a zesílení) operačního zesilovače roven 4,75 MHz. V zapojení bude použit operační zesilovač TSV912AIYST firmy ST microelectronics splňující normu AEC-Q101.

Výstupní napětí budiče tranzistoru je o 0,4 V nižší než napětí na vstupu. Prahové napětí tranzistoru je 700 mV. Budič je proto nutné spínat rail-to-rail komparátorem, nebo komparátorem s otevřeným kolektorem. PWM signál bude generován komparátorem MCP6567 firmy Microchip, který splňuje normu AEC-Q100.

Při maximálním rozdílu napájecího a výstupního napětí je pracovní frekvence největší a tedy zvlnění udržované komparátorem musí být dle 3.1:

$$I_{rip} = \frac{1}{f \cdot L \cdot \left( \frac{1}{U_{in} - U_{out}} + \frac{1}{U_{out}} \right)} = \frac{1}{250 \cdot 10^3 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{1}{4,2 - 2,5} + \frac{1}{2,5} \right)} = 0,405 \text{ A} \quad (5.14)$$

Pracovní frekvence bude s rostoucím proudem klesat, protože napětí na LED roste s proudem a snižuje tak napěťový rozdíl mezi vstupem a výstupem budiče.

Velikosti hysterezního okna komparátoru pro udržení požadovaného zvlnění musí být:

$$U_{hyst} = I_{rip} R_{sense} A_U = 0,405 \cdot 0,056 \cdot 19 = 0,43 \text{ V} \quad (5.15)$$

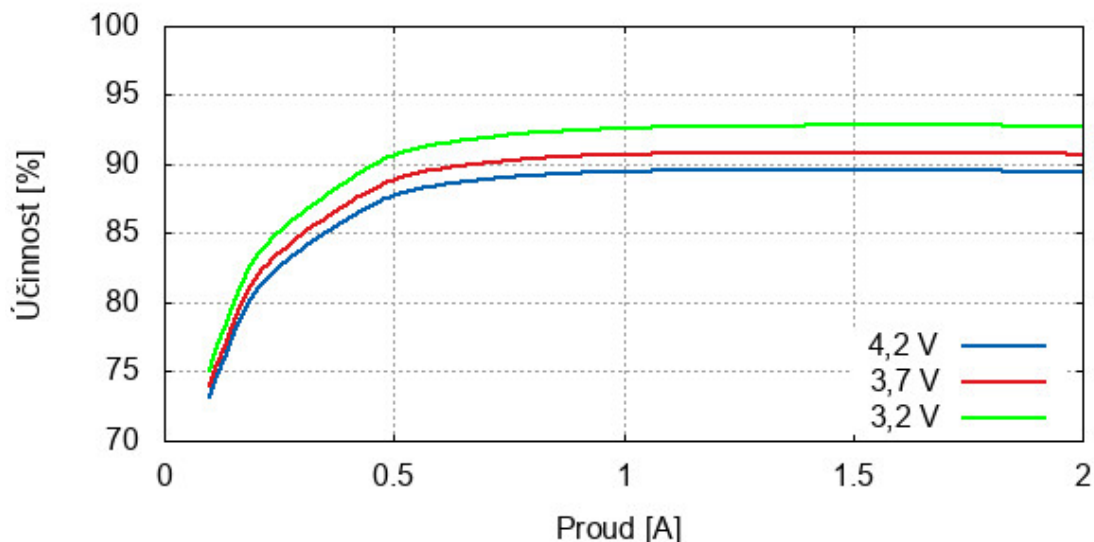
Dle rovnice A.3 je hysterezní napětí závislé na výstupním napětí komparátoru a není tedy konstantní. Pro zvolený komparátor je minimální výstupní napětí 0,6 V, maximální je rovno napájecímu (otevřený kolektor). Hysterezní napětí klesá s klesajícím napájecím napětím. Tento jev působí částečně proti poklesu pracovní frekvence. Vybrané zpětnovazební rezistory musí odpovídat rovnici:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_{hyst}}{U_{2max} - U_{2min}} = \frac{0,43}{4,2 - 0,6} = 0,12 \quad (5.16)$$

Aby bylo možné zanedbat pull-up rezistor, musí být jeho hodnota řádově menší než hodnota zpětnovazebních rezistorů. Pro 1 kΩ pull-up byla zvolena kombinace rezistorů 10 kΩ a 82 kΩ. Této kombinaci odpovídá velikost hysterezního okna 0,39 V a frekvence 275 kHz. Díky nenulovému zpoždění přenosu signálu v operačním zesilovači, komparátoru a budiči tranzistoru bude výsledná frekvence nižší. Přesné hodnoty zpětnovazebních rezistorů bylo nutné vybrat během ožívování zařízení.

### 5.1.8 Teoretická účinnost budiče

Na základě výše uvedených rovnic byla vypočtena přibližná účinnost měniče v závislosti na výstupním proudu a napájecím napětí, výsledná závislost je zobrazena na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Teoretická závislost účinnosti budiče na proudu LED pro různá napájecí napětí

## 5.2 Mikroprocesor

Mikroprocesor se stará o zpracování příkazů uživatele, výpočet vhodného proudu LED dle okolního osvětlení a generování PWM pro řízení budičů LED.

Byl zvolen mikroprocesor ATtiny841 firmy Microchip (dříve Atmel), který pracuje při napětích od 1,7 V, ve spánku má spotřebu pouze  $0,15 \mu\text{A}$ , obsahuje integrovaný senzor teploty a hardwarovou implementaci PWM. Interní teplotní senzor umožňuje určit přibližnou teplotu těla svítivky bez nutnosti použít senzor externí.

Napájení procesoru a integrovaných obvodů je od zbytku zařízení oddělené RC článkem, který filtruje špičky na napájení vznikající během spínání LED. Úbytek na rezistoru  $33 \Omega$  díky malému protékající proudu nepřesahuje 100 mV.

Pro snížení spotřeby zařízení ve vypnutém stavu je napájení integrovaných obvodů budičů LED odděleno tranzistorem, který bude při přechodu mikroprocesoru do spánku vypnut.

Pro účely ladění, programování a případné nahrávání uživatelské konfigurace je na samostatný konektor vyvedeno sériové rozhraní mikroprocesoru.

Na dva zbývající volné piny mikroprocesoru jsou připojeny nízkopříkonové LED, které mohou mít dle přání uživatele různou barvu, (např. červená a UV, UV a bílá, atd.)

### 5.2.1 Měření napájecího napětí

Napájecí napětí bude měřeno AD převodníkem s referencí nastavenou na napájecí napětí procesoru. Vstupní multiplexor je připojen na interní napěťovou referenci 1,1 V. Pro desetibitový výsledek převodu  $AD_{res}$  bude napájecí napětí:

$$U = \frac{1,1 \cdot 1024}{AD_{res}} \quad (5.17)$$

### 5.2.2 Řízení proudu budičů LED

Referenční napětí určující proud budičem LED bude generováno pomocí PWM vyhlazovaného RC filtrem. Výstup z RC článku je navíc připojen k vývodu procesoru, který programovým přecházením mezi stavem vysoké impedance a logickou nulou může přímo vypínat LED a pomocí PWM tak řídit jas ve vyšším rozsahu, než dovoluje použité řešení budiče.

RC článek zároveň omezuje rychlost vzrůstu proudu LED a snižuje proudovou špičku v budiči při jeho zapnutí.

Při taktu procesoru 4 MHz (maximum pro rozsah napájení od 1,8 V) je maximální frekvence PWM 15 625 Hz při možnosti dělení střidy na 255 kroků.

Maximální výstupní napětí filtru je vhodné omezit na hodnotu nižší, nebo rovnou maximálnímu proudu 2 A. Tedy při napájecím napětí 4,2 V na nejvýše 2,128 V. Při zvolení stejných odporů v odporovém děliči bude podmínka splněna (maximálně 2,1 V).

RC článek tvoří dolní propust prvního řádu a má útlum pouze 20 dB na dekádu. Výstupní zvlnění by nemělo překročit hodnotu 10 mV (odpovídá přibližně 10 mA na LED). PWM signál o maximálním napětí 4,2 V by tak měl být utlumen o 52 dB. Stejně odpory tvoří dělič dvěma, tedy útlum samotného RC článku musí být vyšší než 46 dB, což odpovídá mezní frekvenci:

$$f_{mez} = \frac{f_{PWM}}{10^{\frac{K}{20}}} = \frac{15625}{10^{\frac{52}{20}}} = 78,3 \text{ Hz} \quad (5.18)$$

Pro mezní frekvenci daného zapojení pak platí upravený vzorec A.7:

$$f_{mez} = \frac{R + R}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot R \cdot C} = \frac{1}{\pi RC} \quad (5.19)$$

Hodnota kondenzátoru C byla zvolena 1  $\mu\text{F}$ , minimální hodnota rezistorů je tedy:

$$R = \frac{1}{\pi C f_{mez}} = \frac{1}{\pi \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 78,3} = 4,065 \text{ k}\Omega \quad (5.20)$$

Byly zvoleny rezistory s hodnotou 10 k $\Omega$ , která nechává dostatečnou rezervu pro omezení vlivu vyšších harmonických složek PWM signálu, které byly při výpočtu zanedbány.

### 5.3 Měření množství odraženého světla

Měření množství okolního (odraženého) světla je realizováno fototranzistorem VEMT3700-GS08 zapojeným v kombinaci s rezistorem jako odporový dělič. Přesná hodnota rezistoru byla stanovena na základě měření na funkčním vzorku.

Jednoduchým experimentem byla ověřena funkčnost tohoto řešení. Fototranzistor byl schopen detekovat změnou napětí v řádu stovek milivoltů světlo odražené od bílé překážky ve vzdálenosti dva metry. Tato hodnota by měla být pro automatickou regulaci výstupního výkonu dostačující.

### 5.4 Nabíječka Li-Ion akumulátorů

Základní požadavky na nabíječku Li-Ion akumulátorů jsou:

- možnost nechat akumulátor dlouhodobě připojený bez jeho poškození či snížení jeho životnosti,
- maximální nabíjecí proud alespoň 2 A,
- hlídání teploty nabíjeného článku,
- indikace stavu nabíjení.

Bylo zvoleno pracovní napětí 5 V aby bylo možné zapojení napájet levnými nabíječkami pro mobilní telefony.

Základem nabíječky je integrovaný obvod LTC4001. Jedná se o synchronní snižující měnič s nastavitelným proudem. Výhodou tohoto obvodu je minimální počet externích součástek a možnost nastavení nabíjecího proudu pomocí rezistoru, kterým oproti jiným řešením (např. LT3650) teče jen zanedbatelný proud.

Nevýhodou je pak malý rozsah napájecího napětí (4,5–5,5 V), který ztěžuje případné napájení transformátorem (např. při paralelním zapojení několika nabíječek na jeden zdroj).

Vlastnosti obvodu LTC4001 [22]:

- maximální nabíjecí proud 2 A,
- nabíjení konstantním napětím při dosažení  $4,2 \text{ V} \pm 1\%$ ,
- nevyžaduje externí tranzistory ani rezistor na snímání proudu,
- nastavitelný časovač pro ukončení nabíjení,
- nastavitelný nabíjecí proud,
- nastavitelný proud pro ukončení nabíjení,
- hlídání teploty akumulátoru,
- vysoká spínací frekvence 1,5 MHz,
- oživení podvybitých akumulátorů malým proudem,
- automatické dobíjení při poklesu napětí na akumulátoru pod 4,1 V.

Pokud má akumulátor méně jak 3 V, obvod začne nabíjet proudem 50 mA po dobu maximálně jedné čtvrtiny nastaveného maximálního času nabíjení, pokud za tuto dobu napětí na akumulátoru nepřekročí 3 V, je nabíjení ukončeno a pin FAULT signalizuje chybu.

Po překročení 3 V začne nabíjet konstantním proudem, po dosažení maximálního napětí (4,2 V) přechází na nabíjení konstantním napětím. Nabíjení je ukončeno při poklesu nabíjecího proudu pod desetinu nastavené hodnoty. Pokud poté napětí akumulátoru poklesne samovybíjením pod 4,1 V, bude spuštěn nový nabíjecí cyklus.

Červená LED na pinu FAULT indikuje překročení teploty akumulátoru nebo zkrat. Zelená LED indikuje nabíjení, pokud dojde k překročení teploty, bliká s frekvencí 1,5 Hz.

Nabíjecí proud určuje rezistor připojený k pinu PROG. Pro maximální přípustný proud 2 A platí dle dokumentace výrobce ([22]) vzorec:

$$R_{prog} = \frac{457,5 \cdot 1,213}{I_{charge}} = \frac{457,5 \cdot 1,213}{2} = 277,5 \, \Omega \quad (5.21)$$

Při výběru induktoru je nutné uvažovat maximální zvlnění proudu  $\Delta I_L$  do 40 %, při vyšších hodnotách by byla ovlivněna správná funkce obvodu. Pro zvolený proud 2 A nesmí proto zvlnění překročit 0,8 A. Maximální zvlnění nastává, když je napětí akumulátoru rovné polovině napájecího napětí, pro minimální přípustnou indukčnost tedy platí [22]:

$$L = \frac{V_{BAT} - \frac{V_{BAT}^2}{V_{IN}}}{\Delta I_L f} = \frac{2,5 - \frac{2,5^2}{5}}{0,8 \cdot 1,5 \cdot 10^6} = 1,67 \, \mu H \quad (5.22)$$

Byl vybrán stíněný induktor řady SRU8028A firmy Bourns s hodnotou 3,3  $\mu H$ , což odpovídá zvlnění 0,25 A a maximálnímu proudu induktorem 2,125 A. S tolerancí 30 % indukčnost spolehlivě překračuje minimální možnou hodnotu 1,67  $\mu H$ .

Teplota baterie je měřena pomocí 10 k $\Omega$  NTC termistoru, ten může být přímo součástí akumulátoru, nebo může být připojen pomocí samostatného konektoru. Zkratováním pinů konektoru pro termistor je kontrola teploty deaktivována.

Napájení je přivedeno přes Micro USB konektor, jehož polarita je standardizována, proto není nutné implementovat ochranu proti přepólování.

## 5.5 Ochrana akumulátorů

Li-Ion akumulátory jsou velmi citlivé na přepětí a nadproud, při přílišném zatížení dochází k rozkladu elektrolytu a prudkému nárůstu teploty. Může dojít k vzplanutí nebo explozi článku. Proto je akumulátory vhodné vybavit ochrannou elektronikou, která při překročení mezního proudu, případně napětí akumulátor odpojí od zátěže.

Méně významným problémem je podvybití akumulátoru, při kterém opět dochází k poškození vnitřní struktury, nicméně bez nebezpečných následků. Při opakovaném podvybíjení prudce klesá kapacita akumulátoru.

Byl zvolen ochranný obvod BQ29700, který zajišťuje ochranu proti nadproudu, zkratu, přepětí a podpětí. Proudová ochrana je založena na měření úbytku na dvou tranzistorech MOSFET v sérii. Při dosažení 100 mV dojde k rozepnutí tranzistorů a odpojení zátěže. Zátěž je odpojována při překročení napětí na akumulátoru 4,275 V a při poklesu pod 2,8 V.



Špičkový proud zapojení dosahuje hodnoty 4 A. Při výpočtu je s rezervou uvažováno 6 A (např. pro možnost zvýšení proudu LED v další verzi). Odpor tranzistorů v sepnutém stavu pro zvolený vypínací proud je:

$$2R_{DSon} = \frac{U_{max}}{I_{max}} = \frac{0,1}{6} = 16,7 \text{ m}\Omega \quad (5.23)$$

Byl zvolen tranzistor CSD16406Q3 s odporem 7 mΩ v sepnutém stavu při napětí 3 V. Tomu odpovídá maximální proud 7,14 A.

## 6 REALIZACE

### 6.1 Mechanická konstrukce

Tělo svítilny musí být mechanicky odolné, vodotěsné a musí být schopno odvést teplo vznikající na LED. Pro snížení výrobních nákladů musí být vyrobitelné za pomoci základního dílenského vybavení a soustruhu.

Návrh probíhal v programu FreeCad. Tělo s čtveřicí chladících žebér má válcovou podobu a jeho symetrický tvar umožňuje otočením o 180° upravit ovládání i pro leváky.

Mechanická konstrukce je zřejmá z obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Mechanické provedení svítilny

Celková hmotnost svítilny bez akumulátorů je 182 gramů.

#### 6.1.1 Tepelné vlastnosti

Maximální teplota čipu vybrané LED je 150 °C. S rostoucí teplotou klesá měrný výkon a napětí na LED. S klesajícím napětím rostou spínací ztráty v budiči. Pro dosažení co nejnižších ztrát je nutné LED účinně chladit.

Firma Cree udává parametry svých diod pro teplotu přechodu 85 °C. Tato hodnota je při výpočtech uvažována jako maximální přípustná. Účinnost přeměny elektrické energie na světlo se u bílých LED pohybuje okolo 40 %. Výrobce doporučuje při výpočtu chlazení vycházet z účinnosti 25 % [11]. Příkon Cree XP-L2 při buzení proudem 2 A je 6 W, přičemž svítilna obsahuje LED dvě. Celkový tepelný výkon je:

$$P_t = 2 \cdot 0,75 \cdot P = 2 \cdot 0,75 \cdot 6 = 9 \text{ W} \quad (6.1)$$

Vnitřní tepelný odpor použité LED  $R_j$  je  $2,2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ . Pro zlepšení odvodu tepla od čipu jsou LED připájeny na hliníkové chladiče a tyto chladiče jsou k tělu svítilny přišroubovány. Případné nerovnosti kontaktní plochy vyrovnává teplovodivá pasta s tepelným odporem  $0,05 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$  při tloušťce vrstvy  $0,03 \text{ mm}$ .

Tloušťka hliníkového chladiče je  $1,5 \text{ mm}$ , průměr  $14 \text{ mm}$ , tepelná vodivost použité slitiny je  $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Výsledný tepelný odpor kruhového chladiče lze vypočítat jako [11]:

$$R_h = \frac{l}{kA} = \frac{l}{k_{Al}\pi\frac{d^2}{4}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{150\pi\frac{(14 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,065 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (6.2)$$

Reálný odpor bude o něco větší díky malé velikosti zdroje tepla (LED). Mezi materiálem chladiče a pájecí ploškou LED se nachází tenká vrstva mědi, kterou od hliníkové podložky izoluje vrstva dielektrika s malou tepelnou vodivostí  $2,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Tloušťka této vrstvy je přibližně  $100 \text{ } \mu\text{m}$ . Oproti hliníkové podložce se v dielektrické vrstvě teplo příliš nerozptýlí, proto je při výpočtu nutné uvažovat plochu použité LED diody ( $3,45 \text{ mm} \times 3,45 \text{ mm}$ ).

$$R_{diel} = \frac{l}{kA} = \frac{l_{diel}}{k_{diel}xy} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{2,2 \cdot 3,45 \cdot 10^{-3} \cdot 3,45 \cdot 10^{-3}} = 3,82 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (6.3)$$

Na přechodu chladiče a LED vzniká při zanedbání tepelného odporu pájeného spoje teplotní rozdíl:

$$\Delta t = R \cdot P_t = (R_j + R_h + R_{diel}) \cdot 0,75 \cdot P = (2,2 + 0,065 + 3,82) \cdot 0,75 \cdot 6 = 27,4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.4)$$

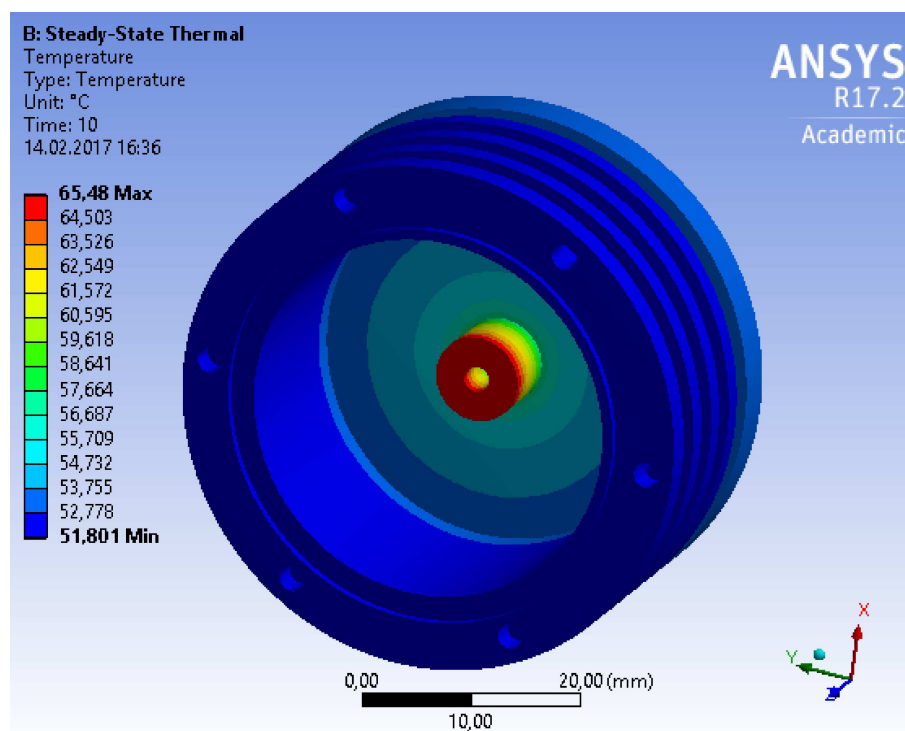
V místě styku chladiče s tělem nesmí teplota přesáhnout  $85 - 27,4 = 57,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Tepelný odpor přechodu tělo-vzduch nesmí být při pokojové teplotě okolí ( $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) větší než:

$$R_t = \frac{\Delta t}{P_t} = \frac{t_t - t_a}{P_t} = \frac{57,6 - 25}{9} = 3,62 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (6.5)$$

Maximální teplota těla nesmí přesáhnout teplotu  $57,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ , aby nedošlo k výraznému snížení účinnosti LED, případně k jejich poškození teplem. Vyšší teplota by také mohla vést ke spálení uživatele při dotyku. Vypočtené hodnoty tepelného odporu tělo-vzduch nelze bez výrazného zvětšení rozměrů svítilny dosáhnout, proto je teplota těla hlídána elektronikou a při překročení nastavené teploty dojde k omezení výstupního proudu.

Tepelný odpor tělo-vzduch je dán mnoha parametry jako např. objem, plocha, tvar, materiál a povrchová úprava těla. Určení přesné hodnoty je poměrně komplikované. Pro orientační zjištění tepelných poměrů byla provedena teplotní simulace v programu ANSYS. Výsledné rozložení teploty je na obrázku 6.2.

Veškeré výše uvedené teplotní výpočty jsou vzhledem k zanedbávání minoritních parametrů pouze orientační a výsledek je nutné brát s rezervou.



Obr. 6.2: Výsledek simulace ustáleného teplotního stavu v programu ANSYS

### 6.1.2 Výroba těla

Tělo je vyrobeno metodou třískového obrábění na soustruhu Proma SM-300E ze slitiny hliníku s označením EN 573-3 AW 6063. Slitiny s obsahem mědi (duraly, označení AW 20xx) jsou lépe obrobitelné, ale přítomnost mědi znesnadňuje dosažení kvalitního a barevně jednotného povrchu při eloxování (elektrolytické oxidaci povrchu). Dobrá eloxovatelnost a odolnost proti korozi u zvolené slitiny AW 6063 je vykoupena tvorbou dlouhých špon při soustružení, které mohou poškrábat již hotový povrch [23].

Pro zvýšení odolnosti proti poškrábání bylo tělo eloxováno, tzn. na jeho povrchu byla elektrolyticky vytvořena nevodivá vrstva oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) s vysokou tvrdostí [24]. Po moření v 20% roztoku hydroxidu sodného ( $\text{NaOH}$ ) bylo tělo připojeno ke zdroji proudu jako anoda. Eloxování probíhalo v hliníkové nádobě (katoda) v 20% kyselině sírové ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) při proudové hustotě  $1,5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$  po dobu 45 minut za teploty lázně mezi 1 až 5 °C.

Pro zlepšení výsledného vzhledu následovalo ponoření do roztoku červené barvy na vejce značky Ovo (běžně doporučované barvivo na textil se příliš neosvědčilo, povrch vykazoval barevné nehomogenity a nebylo možné dosáhnout syté barvy). Barvení probíhalo při teplotě 50 °C po dobu jedné hodiny. Proces byl zakončen zahříváním ve vodní lázni při teplotě 90 °C. Tloušťka výsledné oxidické vrstvy je přibližně 16  $\mu\text{m}$ .

Vnitřní prostor svítlny je chráněn transparentní polykarbonátovou deskou (obchodní označení Marlon FSX) o tloušťce 2 mm. Oproti sklu je polykarbonát výrazně houževnatější a v případě rozbití netvoří ostré střepe. Nevýhodou je malá odolnost proti poškrábání.

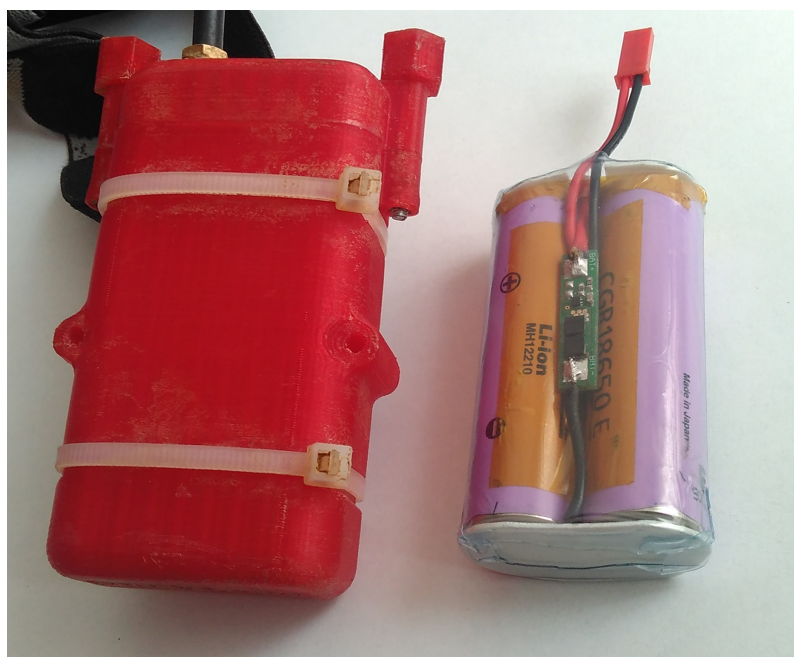
Těsnění tvoří O-kroužek mezi polykarbonátem a tělem. Průchodky na kabel a ovládací osu jsou vyrobeny z mosazného šestihranu soustružením.

### 6.1.3 Pouzdro na akumulátory

Pouzdro na akumulátory bylo vytištěno na 3D tiskárně Rebel II metodou FSD (Fusion Deposition Modelling) z materiálu PET-G (polyethyltereftalát modifikovaný glykolem). Pro zamezení pronikání vody byl povrch impregnován roztokem ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) v acetonu. Výtisk je mechanicky odolný a dostatečně chrání akumulátory před nárazy a vodou.

Výhodou odděleného pouzdra je rovnoměrnější rozložení zátěže na hlavě a možnost použít větší množství článků. Při přechodu na jiný typ akumulátorů stačit upravit rozměry pouzdra. Nevýhodou je vyšší náchylnost kabelu mezi svítilnou a pouzdem na poškození, zvláště v místech průchodu přílbou a v blízkosti kabelových průchodek.

Akumulátor samotný se skládá z dvojice článků Li-Ion 18650 spojených bodováním. Mezi články je umístěna ochranná elektronika a celek je zatažen do smršťovací bužírky. Provedení je zřejmé z obrázku 6.3.



Obr. 6.3: Pouzdro na akumulátory a akumulátor

### 6.1.4 Nabíječka na akumulátory

Nabíječka je umístěna v pouzdře vytištěném na 3D tiskárně. Popisky byly vytvořeny metodou přenosu toneru z papíru na průhlednou lepicí pásku. Stav nabíjení je indikován trojicí barevných diod. Trojitý konektor slouží k připojení akumulátoru (jeden z pinů je pro

termistor, je-li použit). Druhý konektor umožňuje připojit externí termistor, při zkratování vývodů vyřadí kontrolu teploty akumulátoru.



Obr. 6.4: Nabíječka akumulátorů

## 6.2 Optická soustava

Svítilna obsahuje dvě LED Cree XP-L2 s vyzařovacím úhlem  $125^\circ$ . Tato hodnota je výhodná pro osvětlení blízkého okolí. Pro osvětlení vzdálenějších předmětů byla před jednu z LED umístěna čočka z PMMA s udávaným vyzařovacím úhlem  $10^\circ$  a účinností 93 %.

## 6.3 Programové vybavení

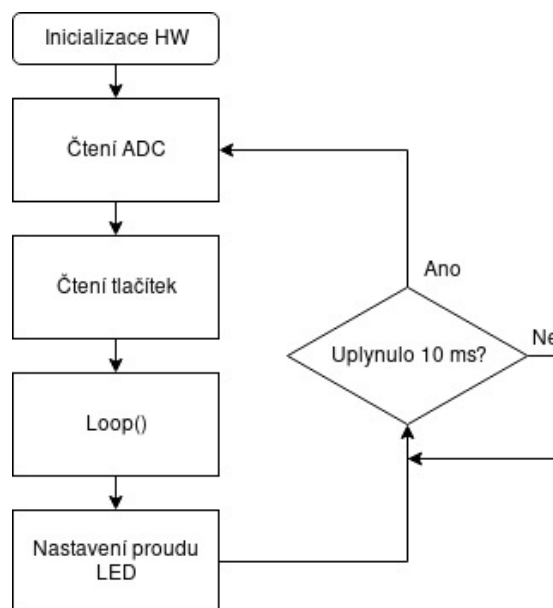
Ovládací program je napsaný v jazyce C s využitím svobodného překladače avr-gcc a knihoven avr-glibc. Skládá se ze dvou základních částí:

- knihovny poskytující abstrakci nad periferiemi,
- řídicí logiky.

Po připojení napájení je provedena inicializace mikroprocesoru a jeho periférií. Následně program přechází do nekonečné smyčky (obrázek 6.5).

Nejprve je čten stav tlačítek, napájecího napětí, teploty zařízení a intenzity okolního světla. Poté je zavolána řídicí logika, která tyto veličiny vyhodnotí a určí proud pro jednotlivé LED. Na vypočtené hodnoty jsou aplikovány limity (nízké napětí a teplota) a výsledek je předán PWM modulu. Řídicí logika proto nemůže způsobit přehřátí svítilny ani zničení akumulátoru podvybitím. Po uplynutí 10 ms od začátku smyčky se cyklus opakuje.

Oddělení řídicí logiky od nízkoúrovňových funkcí na ovládání periférií mikroprocesoru zajišťuje zpřehlednění kódu a zjednodušuje tvorbu dalších ovládacích režimů dle požadavků uživatele. Konkrétní ovládací režim je zvolen při překladač programu úpravou jediného parametru.



Obr. 6.5: Základní činnost ovládacího programu

### 6.3.1 Čtení stavu tlačítek

Čtení tlačítek probíhá každých 10 ms. Poslední tři stavy tlačítka jsou drženy v posuvném registru. Jsou-li dva po sobě jdoucí stavy stejné, je stisk, popř. uvolnění považováno za korektní. Případné zákmity tlačítka jsou takto eliminovány.

Držení historie tří stavů umožňuje detekovat stav, kdy bylo tlačítko právě stisknuto (nejstarší stav uvolněno, ostatní stisknuto), nebo právě uvolněno (nejstarší dva stavy stisknuto, aktuální uvolněno).

Doba stisku a čas od posledního stisku jsou drženy v paměti pro případné využití v řídicí logice.

### 6.3.2 Řízení jasu LED

Řízení jasu LED probíhá na dvou úrovních. Jeden programový modul se stará pouze o generování PWM signálu pro každou z LED. Volitelně lze aktivovat přímé řízení LED druhým PWM signálem. V tomto případě jeden PWM signál generuje referenční napětí pro komparátor a určuje tak proud LED. Druhý signál vypíná periodicky výstup komparátoru a zvyšuje tak rozsah regulovatelného jasu. Tento PWM signál musí mít frekvenci natolik vysokou, aby blikání LED nebylo okem viditelné. Výchozí nastavení používá 122 Hz.

Druhý modul obsahuje vyšší logiku. Na základě zvoleného režimu, napájecího napětí a okolního osvětlení určuje, jaká střída PWM signálu bude použita pro konkrétní LED a zda bude použito přímé řízení LED druhým PWM generátorem. Tento modul obsahuje tři volitelné způsoby řízení jasu:

- normální — jas klesá s klesajícím napájecím napětím,
- konstantní — jas se s napětím nemění,

- automatický — jas je řízen množstvím odraženého světla.

V normálním režimu je nastavena zadaná střída, což při klesajícím napájecím napětí způsobí i pokles referenčního napětí pro komparátor a tedy i pokles proudu LED.

V konstantním režimu je střída upravována na základě měření napájecího napětí tak, aby referenční napětí bylo konstantní. Proud LED zůstává při poklesu napájecího napětí neměnný.

V automatickém režimu je změřeno množství odraženého světla fototranzistorem a výpočtem v PI regulátoru je určena nová střída pro PWM generátor. S rostoucím množstvím odraženého světla klesá proud LED a naopak.

Pro zamezení přehřátí svítily a poškození akumulátoru podvybitím je maximální střída PWM při překročení teplotního nebo napěťového limitu omezena. Součástí modulu je také funkce pro blikání zvolenou LED (např. pro signalizaci vybitého akumulátoru). Lidské oko nevnímá intenzitu světla lineárně, pro zjednodušení je intenzita osvětlení zadaná řídicí logikou umocněna na druhou. Výsledná kvadratická změna jasu se lidskému oku jeví přibližně lineární.

### 6.3.3 PI regulátor

Automatický jas LED je řízen PI regulátorem [25]. Intenzita odraženého světla je porovnávána s uživatelem zvolenou hodnotou. Rozdíl těchto veličin se nazývá regulační odchylka  $e(t)$ .

Proporcionální (P) složka regulátoru je přímo úměrná regulační odchylce s konstantou úměrnosti  $r_0$ :

$$x(t) = r_0 e(t) \quad (6.6)$$

Integrační (I) složka je přímo úměrná integrálu regulační odchylky:

$$x(t) = r_i \int_0^t e(t) dt + x(0) \quad (6.7)$$

Výsledná akční veličina (střída PWM signálu) je dána součtem proporcionální a integrační složky:

$$x(t) = r_0 e(t) + r_i \int_0^t e(t) dt + x(0) \quad (6.8)$$

Po převedení do diskrétního (přechod na proporcionálně sumační regulátor - PS) tvaru lze akční veličinu určit jako:

$$x(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{k=0}^{n-1} e(k) \quad (6.9)$$

### 6.3.4 Řídicí logika

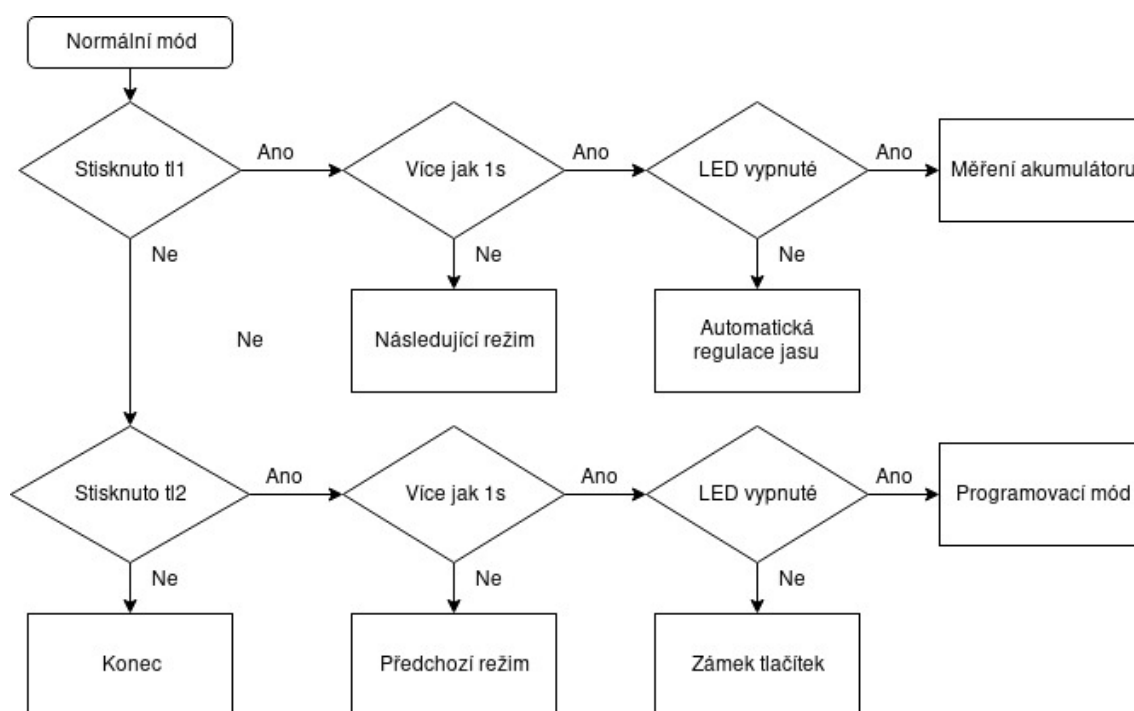
Řídicí logika obsahuje dvě funkce — funkci `init()`, která je volána po připojení napájení, a funkci `loop()`, která je volána každých 10 ms a nesmí být blokující.

Funkce `loop` obsahuje jednoduchý stavový automat, který přepíná světelné režimy na základě příkazů od uživatele. Speleologický režim ovládání byl navržen s ohledem na maximální pohodlnost a jednoduchost. Svítlna se může nacházet v jednom z pěti stavů:



- normální,
- programovací,
- konfigurační,
- transportní zámek.

V normálním módu krátký stisk tlačítek přepíná mezi až 10 volitelnými režimy, jeden z režimů odpovídá vypnuté svítelně. Každý režim je definován svým pořadím a proudem jednotlivými LED. Při dlouhém stisku horního tlačítka přechází svítlna do režimu programování, kde je možné změnit nastavení právě používaného režimu. Po 2,5 sekundě nečinnosti je signalizováno opuštění programovacího režimu krátkým bliknutím a svítlna se vrací zpět do normálního režimu. Dlouhý stisk dolního tlačítka povoluje nebo zakazuje automatickou regulaci jasu. Princip ovládání přibližuje obrázek 6.6.



Obr. 6.6: Vývojový diagram pro normální mód

Dlouhý stisk dolního tlačítka ve vypnutém stavu aktivuje transportní zámek. Pro odblokování je nutné několikrát rychle za sebou stisknout střídavě horní a dolní tlačítko. Dlouhý stisk horního tlačítka ve vypnutém stavu spustí měření napětí akumulátoru. Zbývající energie je oznámena jedním až pěti bliknutími.

Při držení horního tlačítka v okamžiku připojení napětí je aktivován konfigurační mód, ve kterém je možno nastavit krátkými stisky počet přepínatelných režimů. Dlouhý stisk horního tlačítka zakazuje a povoluje programovací režim. Změny se projeví po odpojení a opětovném připojení napájení.

Ve všech módech mimo konfiguračního přechází svítlna do spánku (stav s minimální spotřebou) kdykoliv jsou všechny LED vypnuté.

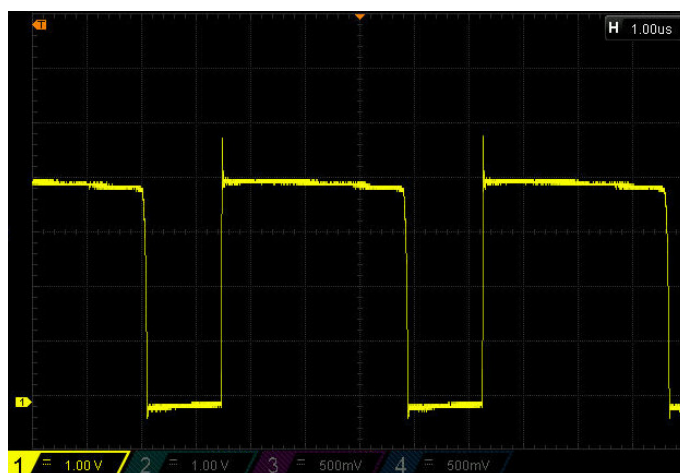
Po překročení nastavené teploty svítivny je maximální proud LED omezen, s rostoucí teplotou je omezení výraznější. Pokles napájecího napětí je indikován ve třech krocích bliknutím a omezením maximálního výkonu. Při poklesu napětí pod 3,1 V je výstupní proud omezen na nejmenší možnou hodnotu pro bezpečné dosažení východu z podzemí.

## 7 MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ

Chování svítily z hlediska elektrického a mechanického bylo ověřeno jak v laboratorních podmínkách tak v podzemí.

### 7.1 Budič LED

Obrázek 7.1 zobrazuje typický průběh napětí v uzlu mezi tranzistorem, cívkou a diodou. Díky omezené rychlosti zotavení diody vznikají v tomto bodě krátké napěťové špičky, které se dostávají do napájecí větve. Mikroprocesor je před nimi chráněn RC článkem.



Obr. 7.1: Typický průběh napětí v uzlu cívka-tranzistor-dioda při napětí 4,2 V a proudu 0,4 A

V první verzi zapojení byl místo RC článku použit diodový detektor. Napěťové špičky pronikaly přes detektor a způsobovaly postupný růst napětí za detektorem, což vyústilo v napěťový průraz operačního zesilovače.

Typický průběh proudu LED ukazuje obrázek 7.2.

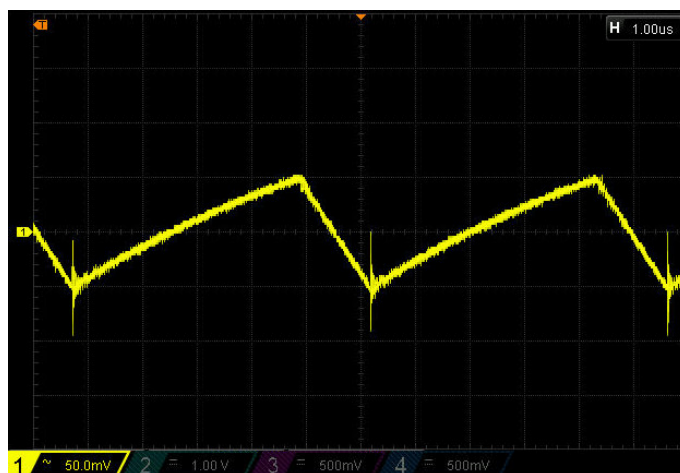
#### 7.1.1 Účinnost

Účinnost je definována jako poměr příkonu a výkonu zařízení:

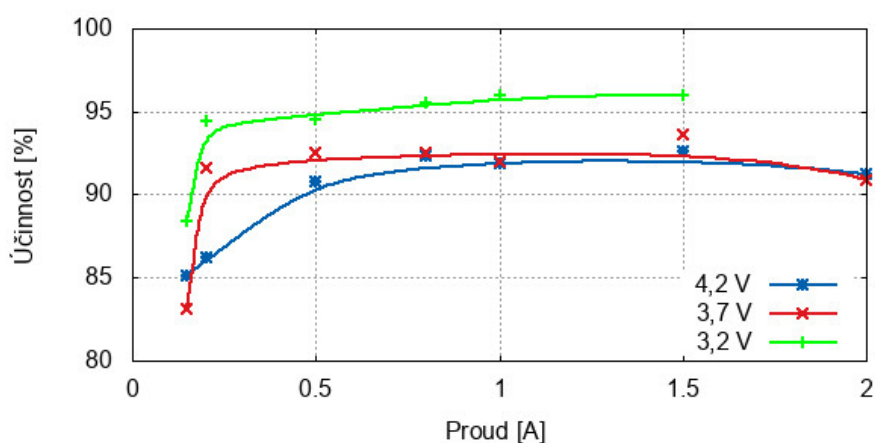
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \% = \frac{U_{LED} I_{LED}}{U_{in} \cdot I_{in}} 100 \% \quad (7.1)$$

Pro minimalizaci vlivů impedance vodičů a měřících přístrojů bylo napětí měřeno přímo na vstupních a výstupních svorkách budiče. Závislost účinnosti na procházejícím proudu pro různá napájecí napětí ukazuje obrázek 7.3.

Naměřené průběhy odpovídají průběhům teoreticky vypočteným (obrázek 5.3). Při malém výstupním proudu je napětí na LED nízké a budič pracuje na vysoké frekvenci, spínací ztráty jsou tak vzhledem k výstupnímu výkonu výrazné a účinnost je malá, navíc



Obr. 7.2: Typický průběh proudu LED při napětí 4,2 V a proudu 0,4 A

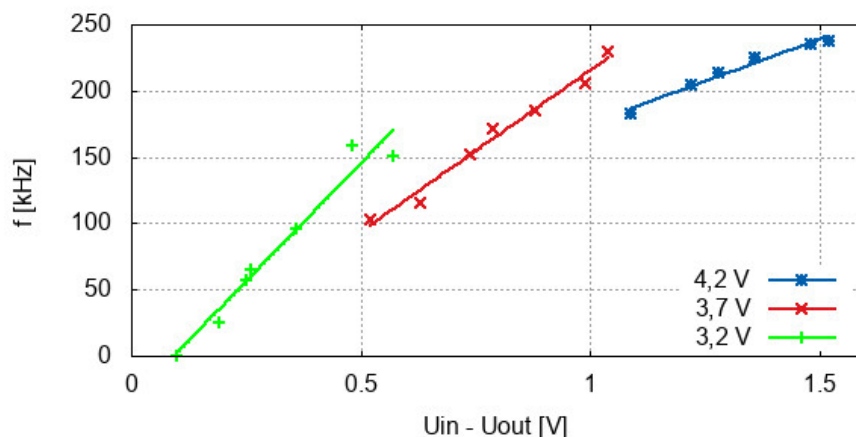


Obr. 7.3: Změřená závislost účinnosti budiče LED na výstupním proudu pro různá napájecí napětí

budič samotný odebírá proud 3 mA. Se vzrůstajícím proudem roste napětí na LED, klesá pracovní frekvence a spínací ztráty, tedy roste účinnost. S narůstajícím proudem začínají růst ztráty vodivostní a účinnost opět klesá. Pro proudy nad 0,5 A účinnost přesahuje 90 %.

Účinnost roste s klesajícím vstupním napětím díky snižování pracovní frekvence (spínacích ztrát na tranzistoru) a vodivostních ztrát na diodě. Při poklesu rozdílu mezi napájecím a výstupním napětím pod 100 mV dochází k zastavení oscilací a tranzistor zůstává trvale otevřený. Účinnost je maximální, ale výstupní proud již nelze dále zvýšit.

Spínací frekvence je dle vzorce 3.1 závislá pouze na vstupním a výstupním napětí, ostatní veličiny jsou konstantní. Změřená závislost frekvence na rozdílu těchto napětí je na obrázku 7.4.



Obr. 7.4: Změřená závislost pracovní frekvence budiče na rozdílu vstupního a výstupního napětí pro různá napájecí napětí

## 7.2 Spotřeba energie

Kapacita dvou zvolených akumulátorů zapojených paralelně je dle dokumentace výrobce 6400 mAh. Při nespotřebování 10 % energie (ochranná elektronika odpojí akumulátor při dosažení 2,8 V) vydrží v nejhorším případě (proud LED 2x 2 A, vstupní napětí budiče stejné jako výstupní) svítilna fungovat po dobu 1 hodinu a 26 minut.

Řídicí program po výstupní proud při přehřívání a vybité baterii značně omezí, reálná výdrž se tak značně prodlouží. Maximální výstupní proud bude nicméně používán pouze sporadicky pro účely fotografování a při prohlídce velkých prostor.

Minimální proud je určen primárně odběrem řídicí elektroniky a budičů samotných. Díky možnosti regulovat proud PWM signálem lze budit LED průměrným proudem od 5 mA. Při odběru 3 mA řídicí elektronikou bude minimální výdrž na plně nabitý akumulátor 30 dní.

Při testování v podzemí nejčastěji využívaný režim odpovídal odběru 300 mA, teoretická průměrná výdrž svítilny by tak přesahovala 19 hodin.

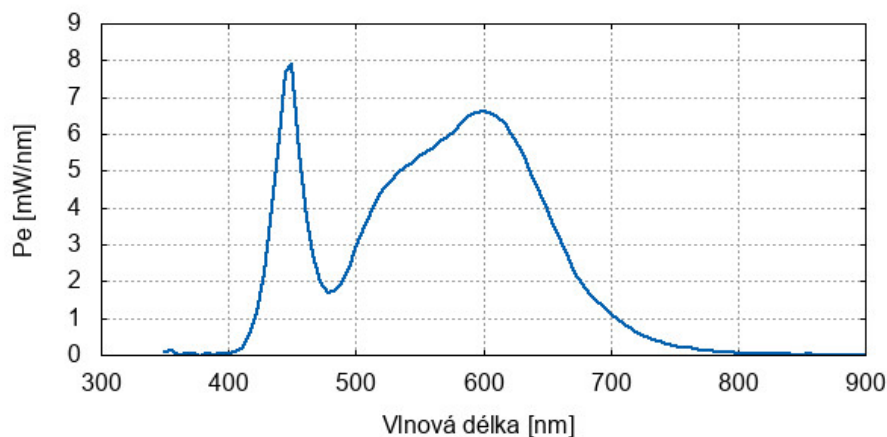
Proudový odběr ve vypnutém stavu je 27  $\mu$ A. Velká část tohoto proudu teče přes zpětnovazební rezistory komparátoru a operačního zesilovače. Zvýšením jejich hodnoty lze za cenu nižší stability budičů dosáhnout nižšího odběru. Tento proud řádově odpovídá samovybíjení akumulátorů, proto je není nutné při skladování odpojovat.

## 7.3 Světelné vlastnosti

Měření světelných vlastností probíhalo v kulovém integrátoru se spektrometrem Spec-box 1211 UV.

### 7.3.1 Spektrální složení

Změřené spektrální složení světla svítilny je zobrazeno na obrázku 7.5



Obr. 7.5: Změřené spektrální složení světla svítilny

V grafu je jasně patrná špička v oblasti okolo 450 nm, což odpovídá modré barvě, kterou vyzařuje samotný polovodičový přechod.

### 7.3.2 Světelný tok

Světelný tok byl dle normy ANSI FL 1-2009 měřen 30 sekund po zapnutí svítilny. Teplota okolí byla 24 °C. Teplota chromatičnosti a index podání barev byly určeny jako průměr tří měření s odstupem 30 sekund. Výsledky měření shrnuje tabulka 7.3.2.

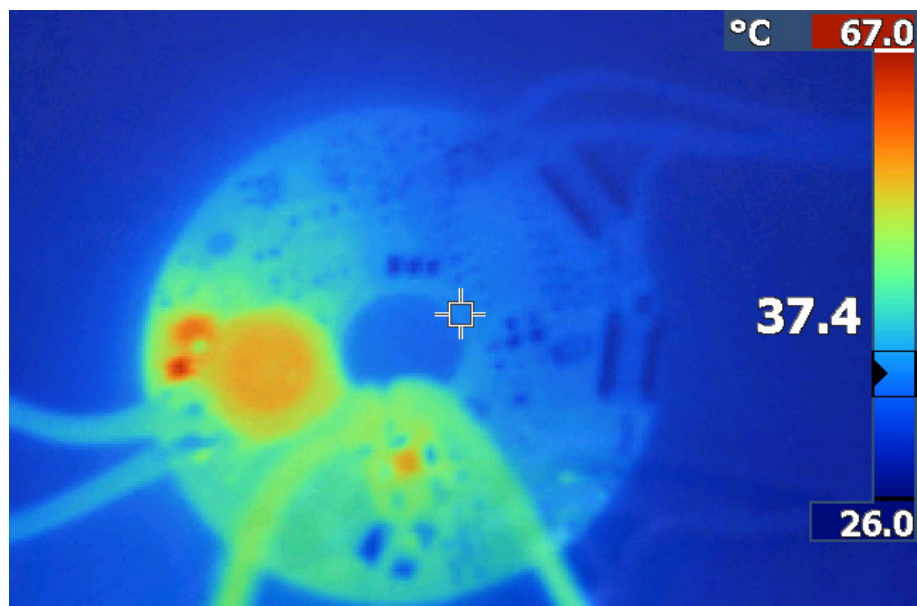
Tabulka 7.1: Změřené světelné parametry svítilny

Minimální světelný tok	1,66 lm
Maximální světelný tok	869 lm
Ustálený světelný tok	785 lm
Teplota chromatičnosti	3937 K
$R_a$	85,7

## 7.4 Teplotní vlastnosti

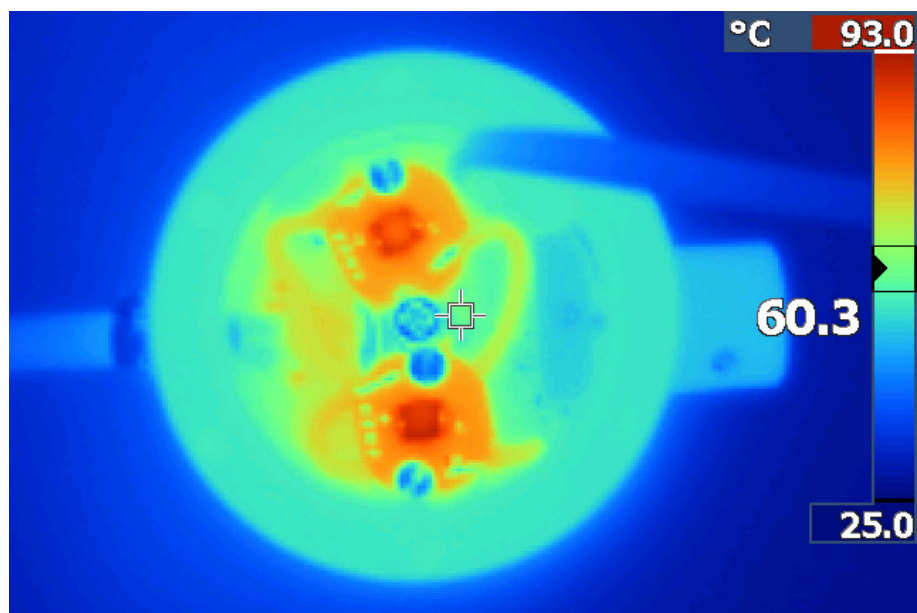
Teplotní vlastnosti byly měřeny termokamerou Fluke Ti25 s emisivitou nastavenou na hodnotu 0,95. Pro získání přesných hodnot by bylo nutné pokrýt měřenou soustavu homogenní vrstvou barvy s definovanou emisivitou. Proto jsou změřená data pouze orientační.

Obrázek 7.6 zachycuje teplotní namáhání elektroniky při proudu 2 A jednou LED a napájecím napětí 4,2 V. Maximální dosažená teplota je 67 °C na volném prostranství při teplotě okolí 25 °C. Díky velkému rozdílu vstupního a výstupního napětí (1,2 V) je střída



Obr. 7.6: Teplotní namáhání elektroniky při proudu 2 A po 30 minutách, napájeno 4,2 V

spínacího signálu nízká a dioda se intenzivně zahřívá. Při snižování napájecího napětí střída roste, teplota diody klesá, ale mírně roste teplota tranzistoru.



Obr. 7.7: Teplotní namáhání svítivky při proudu 2x 2 A po 30 minutách provozu

Jak je patrné z obrázku 7.7, teplota chladičů se blíží teplotě samotných LED díky nízkému teplotnímu odporu přechodu LED-chladič. Na tomto obrázku je také výrazně patrný vliv emisivity materiálu. Lesklý povrch šroubků se jeví jako chladnější než okolí i přes skutečnost, že má teplotu srovnatelnou s chladičem LED. Při měření dosáhla teplota hodnoty 93 °C a krátce po uplynutí 30 minut od zapnutí byl výkon omezen na minimální hodnotu



řídící elektronikou kvůli překročení nastavené teploty těla.

## 7.5 Mechanická odolnost

Odolnost proti nárazu byla testována šesti pády z výšky 2 metry na betonovou podlahu. Při každém pádu byla svítilna upuštěna pod jiným úhlem.

Při testu došlo k poškození LED s optikou. Optický prvek byl na místě držen tlakem mezi LED a polykarbonátovým krytem. Při pádu došlo k vzniku rázové síly působící na kapkovitou čočku (integrální součást) LED a k oddělení této čočky od čipu. Na základě této zkušenosti byla optika přilepena k polykarbonátovému krytu pro eliminaci rázového namáhání LED optickou soustavou.

Dále se na těle objevilo několik menších oděrek, které nemají na funkci žádný vliv. K jinému poškození při pádu nedošlo a svítilna zůstala plně funkční.

Odolnosti proti vodě byla testována ponořením do hloubky jednoho metru po dobu čtyř hodin. Uvnitř svítilny a pouzdra na akumulátory nebyla zaznamenána žádná známka vlhkosti.

Testování teplotní odolnosti probíhalo ve dvou krocích. V prvním byla svítilna vystavena po dobu jedné hodiny teplotě  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V druhém kroku byla po stejnou dobu zahřívána na  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (bez akumulátorů). Nebyly pozorovány žádné změny funkčnosti.

## 7.6 Testování v podzemí

Testování v ostrých podmínkách probíhalo ve Moravském krasu v jeskyních Dagmar a Mastný flek. Podmínky v podzemí dokumentuje obrázek 7.8.



Obr. 7.8: Běžné podmínky ve veřejnosti nepřístupných jeskyních



Mechanická konstrukce je dostatečně odolná a snese hrubé zacházení. Ani při delším vystavení vlhkosti a blátu nebyl zaznamenán průnik nečistot do vnitřního prostoru svítilny. Ovládání v zablácených rukavicích je bezproblémové.

Teplá barva světla působí ve srovnání s výrazně modrým světlem levných svítlen příjemněji. Díky velkému úhlu vyzařování LED bez optiky je osvětlen prostor bezprostředně před uživatelem. Při periferním pohledu pod nohy tak není nutné naklánět hlavu.

Maximální výkon dostačuje k osvětlení rozlehklých domů i pro fotografické účely. Minimální režim umožňuje bezpečný pohyb v členitém terénu, ale slabé osvětlení zvyšuje riziko bloudění při přehlédnutí menších odboček.

Díky ochraně proti pronikání vody je možné svítilnu zbavit nečistot opláchnutím v potoce, nebo pod sprchou.

## 7.7 Automatická regulace jasu

Fototranzistor je umístěn pod úrovní LED, přesto díky odrazům od stěn svítilny a krycí polykarbonátové desky přechází při rozsvícení LED do saturace. Po odstínění fototranzistoru od LED neprůhlednou trubičkou dochází ke značnému snížení jeho citlivosti díky malému množství dopadajícího světla a automatická regulace pracuje spolehlivě pouze pro vzdálenosti menší než jeden metr (v závislosti na typu povrchu, od kterého se světlo odráží).

Tento problém by bylo možné řešit umístěním fototranzistoru do těsné blízkosti překrytu, nebo umístěním čočky soustředící světlo z prostoru do oblasti snímacího prvku.

Druhým problémem je světlo rozptýlené v polykarbonátové desce. I při pečlivém odstínění nechtěných odrazů od těla svítilny vznikají na přechodu kryt-vzduch další odrazy omezující spodní hranici měřeného světla. Při přílišném zvýšení citlivosti fototranzistoru dochází díky takto rozptýlenému světlu k saturaci snímače.

Oba výše uvedené problémy je možné řešit umístěním fototranzistoru odděleně od LED. Tento přístup ale značně zvyšuje složitost konstrukce svítilny.

Automatická regulace jasu se při praktickém provozu příliš neosvědčila. Průhledný překryt těla svítilny se snadno zašpiní blátem, čímž je měření osvětlení vyřazeno z činnosti. Otření překrytu rukou způsobí pouze rozetření bláta do větší plochy. Problém dokumentuje obrázek 7.9. Při dýchání v chladném podzemí vzniká při příznivých podmínkách pára, od které se světlo odráží zpět ke svítelně. Automatická regulace proto snižuje proud LED i když to není vhodné.

Svítilna disponuje funkcionalitou automatické regulace jasu v plné míře, ovšem náročné provozní podmínky eliminují její vliv a v některých případech působí kontraproduktivně.



Obr. 7.9: Stav svítilny po pěti hodinách v podzemí

## 8 ZÁVĚR

V práci byl rozebrán návrh a realizace speleologické svítilny, napájecího zdroje a nabíječky Li-Ion akumulátorů. Byly diskutovány důležité parametry součástek s ohledem na účinnost zapojení.

Z důvodu snížení ceny zapojení a rozšíření osobních znalostí byl navržen hysterezní spínaný budič LED s proudovou zpětnou vazbou pracující na frekvencích do 250 kHz. Pracovní frekvence byla zvolena s ohledem na sluchový rozsah netopýrů zimujících v jeskynních systémech.

Změřená účinnost navrženého budiče LED přesahuje pro proudy vyšší než 0,5 A 90 %. S klesajícím napětím akumulátoru roste až na hodnotu 96,9 %. Výstupní proud budiče se pohybuje od 8 mA do 2 A — v rozsahu 255 kroků od 200 mA do 2 A a 255 kroků od 8 mA do 200 mA. Maximální světelný tok svítilny je 869 lumenů.

Automatická regulace jasu umožňuje snížení výstupního výkonu v závislosti na množství odraženého světla a snižuje tak riziko oslnění při svícení ve stísněných podzemních prostorech. Při praktickém provozu v podzemí se bohužel příliš neosvědčila. Při zašpinění průhledného krytu svítilny přestává regulace fungovat.

Řídicí program byl navržen s ohledem na snadnou rozšiřitelnost. Oddělený návrh ovládání elektroniky od ovládací logiky umožňuje psaní nových režimů s minimálními znalostmi programování. Nízkoúrovňová část obsahuje bezpečnostní limity, které zabraňují poškození svítilny a napájecího zdroje při nevhodně napsané řídicí logice (podvybití, přehřátí).

Základní režim obsahuje zámek ovládání pro transport svítilny v batohu, teplotní a napěťovou ochranu. Při poklesu napětí baterie pod stanovenou mez je maximální proud postupně omezován pro prodloužení výdrže. Tento přístup zajišťuje uchování dostatečné časové rezervy pro bezpečné opuštění podzemí.

Mechanická konstrukce svítilny chrání elektroniku před vnějšími vlivy. Symetrická válcová konstrukce je výhodná z hlediska snadné vyrobitelnosti a možnosti otočením o 180° upravit ovládání pro leváky. Nízká hmotnost celku — 182 gramů bez baterie, 277 gramů s baterií — snižuje namáhání krčních svalů při dlouhých expedicích.

Baterie s kapacitou 6400 mAh umožňuje nepřetržitý provoz minimálně po dobu 1,5 hodiny při maximálním výkonu a přes 30 dní na nejnižší režim. Součástí napájecího zdroje je ochrana akumulátorů před zkratem, nadproudem, přepětím a podpětím.

Nabíječka Li-Ion akumulátorů je napájena přes mikro USB konektor levným zdrojem pro mobilní telefony. Nabíjecí proud je 2 A. Nabíjení je automaticky ukončeno při poklesu proudu pod desetinu počáteční hodnoty.

Návrh svítilny včetně veškeré dokumentace byl zveřejněn pod svobodnými licencemi *GNU GPL 2* a *CERN Open Hardware Licence v1.2* na serveru GitHub.

Výsledná cena svítilny v kusovém množství (bez započtení práce) se pohybuje pod pětinou ceny komerčně prodávaných svítilen se srovnatelnými parametry a nepřesahuje 1500 Kč.

Svítilna v nynějším stavu patří mezi jednu z nejvýkonnějších v českém podzemí. Při

několika výpravách do jeskyní se plně osvědčila nejen jako osobní zdroj světla, ale také jako přisvětlení při fotografování. Do budoucna je možné dále navýšit světelný tok pouze výměnou několika kritických součástí (spínací tranzistor, induktor). Navržený budič LED bude použit při konstrukci malé záložní svítilny.

## LITERATURA

- [1] *Scurion* [online]. [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: <http://www.scurion.ch/>
- [2] *ZebraLight* [online]. [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: <http://www.zebralight.com/>
- [3] *Petzl* [online]. [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: <https://www.petzl.com>
- [4] *Luciferlights* [online]. [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: <http://luciferlights.net/>
- [5] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje - světelné diody* [online]. S Lamp s.r.o., 2009. [cit. 2016-01-10]. Dostupné z URL: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39810.pdf>
- [6] HABEL, Jiří a Petr ŽÁK. *Elektronické světlo 1* [online]. Praha, 2011 [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: [https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/ES1/A5M15ES1\\_final.pdf](https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/ES1/A5M15ES1_final.pdf)
- [7] MURPHY, Thomas W. Maximum spectral luminous efficacy of white light. *Journal of Applied Physics* [online]. American Institute of Physics, 2012, 111(10) [cit. 2016-10-01]. DOI: 10.1063/1.4721897. ISSN 0021-8979.
- [8] *Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier* [online]. 2014 [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>
- [9] *Cree XLamp XP-L2 LED Data Sheet* [online]. Durham, 2016 [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/dsxp12.pdf>
- [10] Barevná teplota. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%A1\\_teploata](https://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%A1_teploata)
- [11] *Thermal Management of Cree XLamp LEDs* [online]. Durham, 2016 [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLampThermalManagement.pdf>
- [12] Secondary (Rechargeable) Batteries. *Battery University* [online]. 2016 [cit. 2016-10-06]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)
- [13] Summary Table of Lithium-based Batteries. *Battery University* [online]. 2016 [cit. 2016-10-06]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_216\\_summary\\_table\\_of\\_lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries)

- [14] Battery Specification Charts *Power Systems : Elite* [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://www.e-fliterc.com/powersystems/batteries/BatteryCharts.aspx>
- [15] KADLEC, J, R CIPIN, D CERVINKA, P VOREL a B KLIMA. Li-ion accumulators for propulsion system of electric airplane VUT 051 RAY. *Journal Of Solid State Electrochemistry* [online]. SPRINGER, 1408, 18(8), 2307-2313 [cit. 2016-10-10]. DOI: 10.1007/s10008-013-2312-z. ISSN 1432-8488.
- [16] NCR18650B. *Panasonic* [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <https://na.industrial.panasonic.com/sites/default/pidsa/files/ncr18650b.pdf>
- [17] *Switch-Mode Power Supply: Reference Manual* [online]. 2014, 73s [cit. 2016-10-20]. Dostupné z: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/SMPSRM-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/SMPSRM-D.PDF)
- [18] *Power Loss Calculation With Common Source Inductance: Consideration for Synchronous Buck Converters* [online]. Texas Instruments, 2011 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slpa009a/slpa009a.pdf>
- [19] *Ontogeny, functional ecology and evolution of bats*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, s. 139-140. ISBN 0-521-62632-3.
- [20] Basic Calculation of a Buck Converter 's Power Stage. *Texas Instruments* [online]. 2015 [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>
- [21] *Current Mode Hysteretic Buck Regulators: Application Note 1487* [online]. National Semiconductor, 2006 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://application-notes.digchip.com/006/6-9241.pdf>
- [22] *LTC4001 - 2A Synchronous Buck Li-Ion Charger* [online]. Milpitas: Linear Technology Corporation, 2006 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4001f.pdf>
- [23] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. : il. ISBN 80-89041-88-4.
- [24] REMEŠOVÁ, Michaela. *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [25] ASTROM, Karl J. a Tore. HAGGLUND. *PID controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2nd ed. Research Triangle Park, N.C.: International Society for Measurement and Control. ISBN 15-561-7516-7.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

LED	Light-Emitting Diode, svítivá dioda
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
USB	Universal Serial Bus
CRI	Color Rendering Index, index podání barev
EM	Electro Magnetic, elektro magnetické
DC	Direct Current, stejnosměrný proud
DPS	Deska plošných spojů
AD(C)	Analog to Digital (Converter), analogový převodník
SEPIC	Single-Ended Primary-Inductor Converter
PWM	Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace
DCR	DC Resistance, stejnosměrný odpor
SRF	Self Resonant Frequency, frekvence vlastní rezonance
GBW	Gain Bandwidth Product, tranzitní kmitočet
AEC	Automotive Electronics Council, automobilové normy
IPx8	Stupeň ochrany před vniknutím vody - chráněno proti potopení
PETG	polyethylentereftalát modifikovaný glykolem
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
SMD	Surface Mount Devices
PI regulátor	Proporcionálně derivační regulátor
PS regulátor	Proporcionálně sumační regulátor
FSD	Fusion Deposition Modelling
PMMA	polymethylmetakrylát
$R_a$	Index podání barev
$T_c$	Barevná teplota, teplota chromatičnosti
$\eta$	Měrný výkon
$\Phi$	Světelný tok
$R_{DSon}$	Odpor kanálu v sepnutém stavu
$D$	Střída

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Karbidová svítidla Petzl Aceto (převzato z [3]) . . . . .	9
1.2	Scurion 1500 (převzato z [1]) . . . . .	10
1.3	Svítidla ZebraLight (převzato z [2]) . . . . .	11
1.4	Svítidla Petzl Duo LED 14 (převzato z [3]) . . . . .	12
1.5	Svítidla Petzl Nao (převzato z [3]) . . . . .	13
1.6	Svítidla DarkStar . . . . .	13
2.1	Teploty chromatičnosti (převzato z [10]) . . . . .	17
2.2	Závislost relativního světelného toku na teplotě přechodu bílé LED (upraveno z [9]) . . . . .	18
2.3	Ovlivnění životnosti LED pracovní teplotou (upraveno z [5]) . . . . .	18
3.1	Snižující měnič . . . . .	20
3.2	Zvyšující měnič . . . . .	21
3.3	SEPIC měnič . . . . .	21
3.4	Principiální schéma hysterezního měniče . . . . .	22
4.1	Vybíjecí křivky NCR18650B pro různé proudy (upraveno z [16]) . . . . .	25
4.2	Nabíjení Li-Ion (upraveno z [16]) . . . . .	26
5.1	Blokové schéma svítidla . . . . .	27
5.2	Schéma navrhovaného budiče . . . . .	28
5.3	Teoretická závislost účinnosti budiče na proudu LED pro různá napájecí napětí . . . . .	33
6.1	Mechanické provedení svítidla . . . . .	38
6.2	Výsledek simulace ustáleného teplotního stavu v programu ANSYS . . . . .	40
6.3	Pouzdro na akumulátory a akumulátor . . . . .	41
6.4	Nabíječka akumulátorů . . . . .	42
6.5	Základní činnost ovládacího programu . . . . .	43
6.6	Vývojový diagram pro normální mód . . . . .	45
7.1	Typický průběh napětí v uzlu cívka-tranzistor-dioda při napětí 4,2 V a proudu 0,4 A . . . . .	47
7.2	Typický průběh proudu LED při napětí 4,2 V a proudu 0,4 A . . . . .	48
7.3	Změřená závislost účinnosti budiče LED na výstupním proudu pro různá napájecí napětí . . . . .	48
7.4	Změřená závislost pracovní frekvence budiče na rozdílu vstupního a výstupního napětí pro různá napájecí napětí . . . . .	49
7.5	Změřené spektrální složení světla svítidla . . . . .	50
7.6	Teplotní namáhání elektroniky při proudu 2 A po 30 minutách, napájeno 4,2 V . . . . .	51
7.7	Teplotní namáhání svítidla při proudu 2x 2 A po 30 minutách provozu . . . . .	51
7.8	Běžné podmínky ve veřejnosti nepřístupných jeskyních . . . . .	52
7.9	Stav svítidla po pěti hodinách v podzemí . . . . .	54



A.1	Zapojení komparátoru s hysterezí . . . . .	63
A.2	Zatížená dolní propust RC . . . . .	64

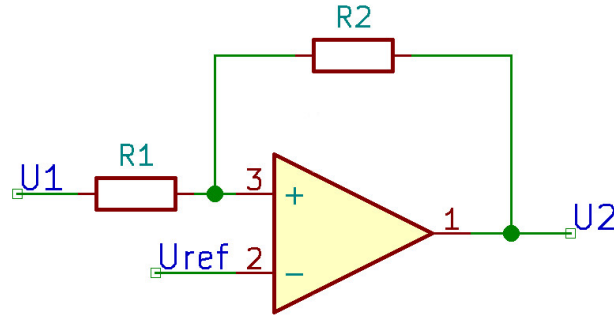
## SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Odvození použitých rovnic</b>	<b>63</b>
A.1	Odvození hysterezního napětí nesymetricky napájeného komparátoru . . .	63
A.2	Odvození přenosu a mezní frekvence zatížené dolní propusti . . . . .	63
<b>B</b>	<b>Schémata zapojení</b>	<b>65</b>
B.1	Nabíječka Li-Ion . . . . .	65
B.2	Svítilna . . . . .	66
<b>C</b>	<b>Výkres těla svítilny</b>	<b>66</b>

## A ODVOZENÍ POUŽITÝCH ROVNIC

### A.1 Odvození hysterezního napětí nesymetricky napájeného komparátoru

Zapojení komparátoru s hysterezí je na obrázku A.1.



Obr. A.1: Zapojení komparátoru s hysterezí

Pro výstup komparátoru blízký nule je  $U_{ref} > U_+$  a platí:

$$U_{+0} = U_1 - R_1 I_{R1,R2} = U_1 - R_1 \frac{U_1 - U_{2min}}{R_1 + R_2} \quad (A.1)$$

Obdobně pro výstup blízký napájecímu napětí ( $U_{ref} < U_+$ ) platí:

$$U_{+1} = U_1 + R_1 I_{R1,R2} = U_1 + R_1 \frac{U_{2max} - U_1}{R_1 + R_2} \quad (A.2)$$

Hysterezní napětí je pak:

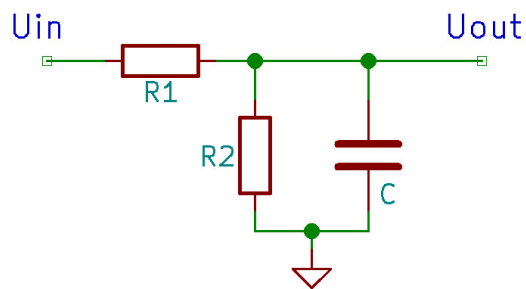
$$\begin{aligned} U_{hyst} &= U_{+1} - U_{+0} = U_1 + R_1 \frac{U_{2max} - U_1}{R_1 + R_2} - \left( U_1 - R_1 \frac{U_1 - U_{2min}}{R_1 + R_2} \right) \\ &= (U_{2max} - U_{2min}) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{aligned} \quad (A.3)$$

### A.2 Odvození přenosu a mezní frekvence zatížené dolní propusti

Schéma odvozovaného filtru je na obrázku A.2.

Pro přenos článku platí:

$$K = \frac{\frac{R_2 \frac{1}{pC}}{R_2 + \frac{1}{pC}}}{R_1 + \frac{R_2 \frac{1}{pC}}{R_2 + \frac{1}{pC}}} = \frac{1}{\frac{R_1(R_2 + \frac{1}{pC})}{R_2 \frac{1}{pC}} + 1} = \frac{R_2}{R_1 R_2 pC + R_1 + R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{1 + \frac{R_1 R_2 pC}{R_1 + R_2}} \quad (A.4)$$



Obr. A.2: Zatížená dolní propust RC

Přenos na nízkých frekvencích odpovídá odporovému děliči  $R_1, R_2$ :

$$K_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{A.5})$$

Mezní frekvence je taková frekvence, kdy přenos filtru poklesne na polovinu oproti počáteční hodnotě, tedy kdy platí:

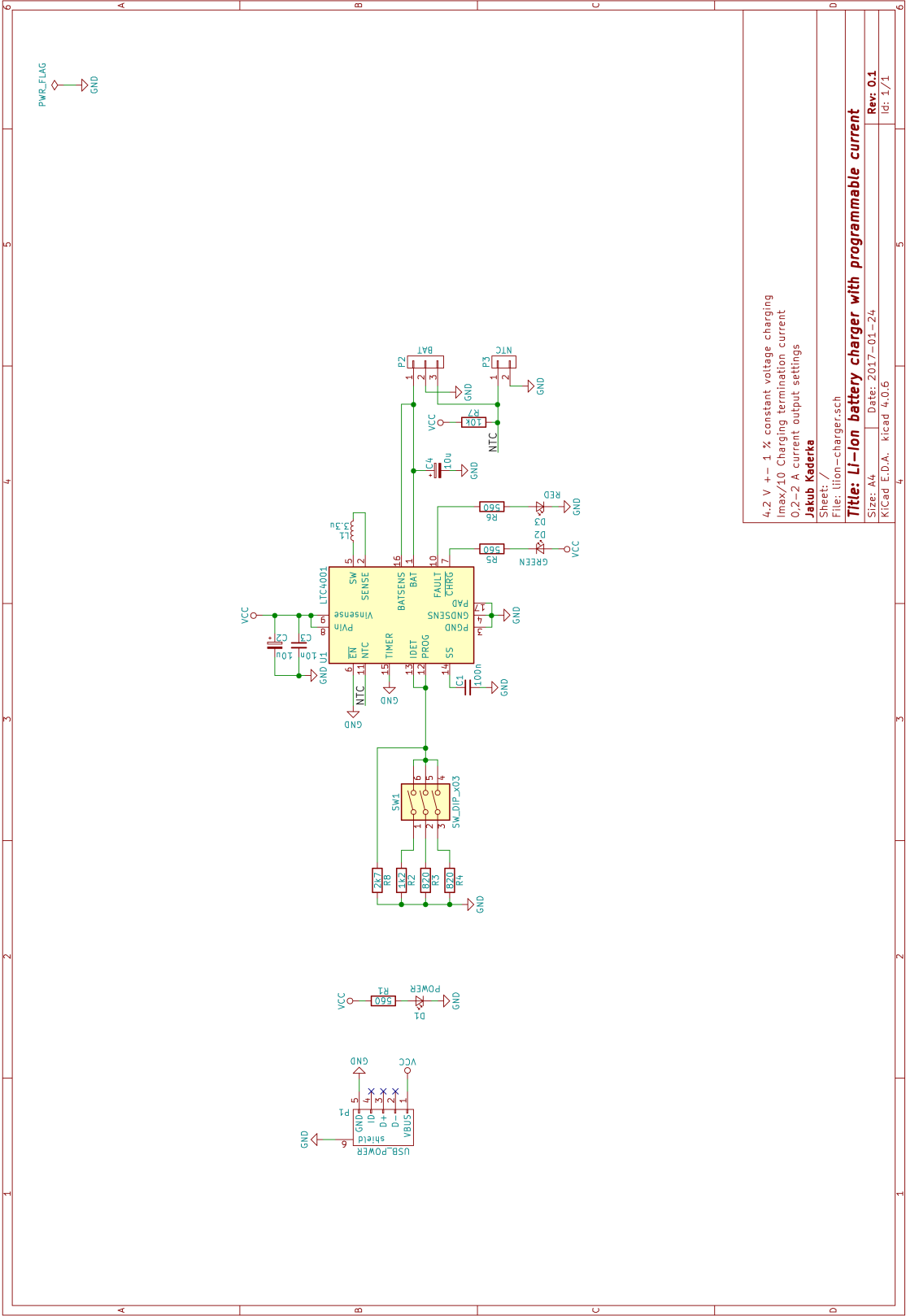
$$1 = \frac{pR_1R_2C}{R_1 + R_2} = \frac{2\pi fR_1R_2C}{R_1 + R_2} \quad (\text{A.6})$$

Mezní frekvence je tedy:

$$f = \frac{R_1 + R_2}{2\pi R_1R_2C} \quad (\text{A.7})$$

B SCHÉMATA ZAPOJENÍ

B.1 Nabíječka Li-Ion



**250 kHz Switching frequency**  
max 2A/LED  
3-4.2 V input  
**Jakub Kaderka**  
File: headlamp.sch  
Sheet: /  
**Title: Darkstar Mk.II**  
Size: A4 Date: 2016-12-28  
Kicad E.D.A. kicad 4.0.6  
Rev: 0.2  
Id: 1/1

## C VÝKRES TĚLA SVÍTILNY

